

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**  
**DISEÑO DE UN PACK DE BATERÍAS PARA**  
**MOTOCICLETAS ELÉCTRICAS**

**AUTORA:** Cristina Torrejón Pérez.  
**TITULACIÓN:** Ingeniería Industrial.  
**TUTOR:** David Mauricio Alba Lucero.  
**DIRECTOR:** Juan Carlos García Prada.  
**DEPARTAMENTO:** Ingeniería Mecánica.



A mi abuelo Antonino.



En primer lugar deseo expresar mi agradecimiento a Mauricio Alba, tutor de este Proyecto Fin de Carrera, por su dedicación en este proyecto. En todo momento se mostró solícito para resolver mis dudas. Del mismo modo, quisiera agradecer a Juan Carlos García Prada su interés.

Asimismo, me gustaría agradecerle a Álvaro García Menéndez su colaboración, pues sus consejos me fueron de gran ayuda.



Leganés, 20 de Julio de 2010.



## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| ÍNDICE .....  | 5  |
| ÍNDICE DE TABLAS. ....  | 7  |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....  | 8  |
| 1. OBJETIVOS .....  | 11 |
| 2. INTRODUCCIÓN. ....   | 14 |
| 3. ESTADO DEL ARTE.....   | 16 |
| 3.1. PARÁMETROS IMPORTANTES DE LAS BATERÍAS.....                      | 18 |
| 3.2. EFECTO MEMORIA.....  | 20 |
| 3.3. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES. TIPOS DE BATERÍAS. ....                 | 21 |
| 3.4. ELECCIÓN DE LA BATERÍA ADECUADA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS. ....  | 31 |
| 3.5. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ACTUALES.....                               | 33 |
| 3.6. FABRICANTES.....   | 42 |
| 3.7. COMPARACIÓN DE CELDAS PRISMÁTICAS FRENTE A CELDAS CILÍNDRICAS. . | 45 |
| 4. CONTROLADORES.....   | 48 |
| 5. ANÁLISIS DE LAS CELDAS. ....                                       | 53 |
| 5.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN. ....                                     | 55 |
| 5.2. ELECCIÓN DE LA CELDA. ....                                       | 58 |
| 6. DISEÑO DEL PACK DE BATERÍAS. ....                                  | 67 |
| 6.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE CONEXIONADO .....                           | 68 |
| 6.2. SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN.....                               | 70 |
| 6.3. BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS). ....                            | 72 |
| 6.4. PRO-ENGINEER .....   | 77 |
| 6.4.1. CREACIÓN DEL DISEÑO CON PRO-ENGINEER.....                      | 77 |
| 7. GENERACIÓN DE CALOR.....   | 85 |
| 7.1. PARÁMETROS A CONSIDERAR.....                                     | 87 |
| 7.1.1. COEFICIENTE DE CONDUCCIÓN .....                                | 87 |



|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 7.1.2. | COEFICIENTE DE CONVECCIÓN.....   | 88  |
| 7.1.3. | UMBRALES DE TEMPERATURA ACEPTABLES.....  | 88  |
| 7.1.4. | GEOMETRÍA DEL PACK.....  | 88  |
| 7.1.5. | CALOR GENERADO.....  | 89  |
| 7.1.6. | SIMPLIFICACIONES.....  | 89  |
| 7.2.   | CONDUCCIÓN CON GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA EN UNA PARED PLANA..  | 90  |
| 7.3.   | FEMAP.....   | 95  |
| 7.3.1. | CONCEPTOS SOBRE LA CARGA Y DESCARGA.....   | 95  |
| 7.3.2. | EVALUACIÓN DE LAS TEMPERATURAS CON FEMAP .....   | 96  |
| 8.     | PRESUPUESTO .....  | 107 |
| 9.     | CONCLUSIONES .....   | 110 |
| 10.    | TRABAJOS FUTUROS .....   | 115 |
| 11.    | REFERENCIAS. ....  | 117 |
|        | ANEXOS.....  | 120 |
|        | ANEXO I. Características de las celdas analizadas. ....  | 121 |
|        | ANEXO II. Características resumidas de las celdas analizadas. ....                                       | 123 |
|        | ANEXO III. Modelos de celdas con energía específica >150Wh/kg.....                                       | 125 |
|        | ANEXO IV. Hoja de características de Enerland PQ5350LP. ....   | 126 |
|        | ANEXO V. Instrucciones de seguridad para baterías de polímeros de litio proporcionadas por Enerland..... | 127 |
|        | ANEXO VI. Advertencias e instrucciones de carga de Enerland. ....  | 128 |



## ÍNDICE DE TABLAS.

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 3-1: Comparación de las diferentes tecnologías basadas en litio. ....                         | 27  |
| Tabla 3-2. Resumen de las características de diferentes tipos de baterías. ....                     | 29  |
| Tabla 3-3. Comparación de los formatos de baterías cilíndricas y prismáticas. ....                  | 46  |
| Tabla 4-1: Comparación de características de controladores UQM PowerPhase 75 y<br>Sevcon Gen4. .... | 50  |
| Tabla 5-1: Datos sobre diferentes modelos de celdas. ....   | 53  |
| Tabla 5-2: Modelos de celdas con energía específica >150Wh/kg. ....                                 | 58  |
| Tabla 5-3: Mejores modelos de cada fabricante seleccionado. ....                                    | 59  |
| Tabla 6-1: Valores obtenidos con las diferentes configuraciones de las celdas. ....                 | 70  |
| Tabla 9-1: Temperaturas obtenidas con Femap para los diferentes casos. ....                         | 112 |

## ÍNDICE DE FIGURAS.

|   |    |
|---|----|
| Figura 3-1. Diferentes formatos de ultra condensadores marca Maxwell. ....                                | 28 |
| Figura 3-2. Comparación de las diferentes tecnologías de baterías (Wh/l frente a Wh/Kg.).....             | 30 |
| Figura 3-3. Tesla Roadster y detalle del cargador. ....   | 34 |
| Figura 3-4. Reva. ....  | 35 |
| Figura 3-5. Motocicleta Vectrix VX-1.....   | 36 |
| Figura 3-6. Detalle de la recarga eléctrica, motocicleta Brammo Enertia. ....                             | 37 |
| Figura 3-7. Brammo Enertia. ....  | 37 |
| Figura 3-8. Motocicleta modelo Zero S, de Zero Motorcycles. ....  | 38 |
| Figura 3-9. Punto de recarga eléctrica, de la marca CirCarLife. ....                                      | 38 |
| Figura 3-10. Dodge EV. ....   | 39 |
| Figura 3-11. Detalle interior Dodge EV.....   | 39 |
| Figura 3-12. Dodge Circuit EV.....  | 40 |
| Figura 3-13. Lightning GT.....  | 41 |
| Figura 3-14. Motocicletas Bereco.....   | 41 |
| Figura 3-15. Celda prismática de la marca A123 Systems.....   | 42 |
| Figura 4-1: Controlador UQM PowerPhase 75.....  | 48 |
| Figura 4-2: Controladores de la marca Sevcon.....   | 49 |
| Figura 5-1: Celda Enerland PQ-5350LP.....   | 60 |
| Figura 5-2 : Celdas individuales 18650 .....  | 61 |
| Figura 5-3: Pack de baterías del Tesla Roadster .....   | 61 |
| Figura 5-4: Detalle de la ubicación y el espacio ocupado por el pack de celdas en el Tesla Roadster ..... | 61 |
| Figura 5-5: Killacycle. ....  | 62 |
| Figura 5-6: Detalle de las baterías A123 Systems utilizadas por KillaCycle.....                           | 63 |
| Figura 5-7: Dodge Circuit EV.....   | 63 |
| Figura 5-8: Pack de baterías de A123 para Chrysler.....   | 64 |
| Figura 5-9: Fisker Karma .....  | 65 |





|  |     |
|--|-----|
| Figura 6-1: Esquema representativo de una celda.....   | 68  |
| Figura 6-2: Esquema de tres celdas conectadas en serie.....  | 68  |
| Figura 6-3: Esquema de tres celdas conectadas en paralelo. ....  | 69  |
| Figura 6-4: Conexión del BMS. ....   | 75  |
| Figura 6-5: Detalle de un pack de baterías con el BMS instalado. ....  | 76  |
| Figura 6-6: Esquema de conexión de n baterías en serie y tres ramas en paralelo.....   | 77  |
| Figura 6-7: Conjunto formado por tres celdas. ....   | 78  |
| Figura 6-8: Bloque de 24 celdas. ....  | 79  |
| Figura 6-9: Pack de baterías completo. ....  | 80  |
| Figura 6-10: Colocación de las celdas. En el caso de la izquierda la configuración es 4s1p. En el caso de la derecha la configuración es 4s2p..... | 81  |
| Figura 6-11: Conexión de los conjuntos en paralelo. ....   | 81  |
| Figura 6-12: Vista lateral del conjunto. ....  | 82  |
| Figura 6-13: Esquema de conexión de las placas de circuito impreso del BMS.....  | 83  |
| Figura 7-1: Calor generado durante la carga a 1C, $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ . ....                         | 97  |
| Figura 7-2: Diagrama de líneas isotermas para el cas de carga a 1C. ....   | 98  |
| Figura 7-3: Calor generado durante la carga a 2C, $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ . ....                         | 99  |
| Figura 7-4: Sección del calor generado durante la carga a 2C, $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ . ....             | 100 |
| Figura 7-5: Calor generado durante la descarga, $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 25^\circ\text{C}$ . ....                           | 101 |
| Figura 7-6: Líneas isotermas durante la descarga, $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 25^\circ\text{C}$ . ....                         | 102 |
| Figura 7-7: Calor generado durante la descarga, $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ . ....                           | 103 |
| Figura 7-8: Calor generado durante la descarga, $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ . ....                           | 104 |
| Figura 7-9: Calor generado durante la descarga, $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 25^\circ\text{C}$ . ....                           | 105 |



## 1. OBJETIVOS

## 1. OBJETIVOS

El presente Proyecto Fin de Carrera surge de la necesidad de recabar información sobre baterías para vehículos eléctricos, como parte de un proyecto global, dado que el departamento de Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid tiene previsto el diseño y creación íntegros de una motocicleta eléctrica en un futuro próximo. Es por ello por lo que con este documento se pretende abordar la problemática de las baterías para dicho tipo de vehículos.

Los sistemas de almacenamiento de energía son el punto débil de los vehículos eléctricos que están empezando a salir ya al mercado. Sus prestaciones limitadas y su alto precio relativo, hacen dura la competencia con los vehículos convencionales de combustión. Sin embargo, existe una creciente demanda social de tecnologías limpias, más respetuosas con el medio ambiente que hacen especialmente deseable el desarrollo de vehículos eléctricos, al menos para su uso en entornos urbanos.

El objetivo final del proyecto consiste en el diseño de un pack de baterías que sea óptimo para el funcionamiento de un vehículo eléctrico. Para ello, habrá que profundizar en el estudio de dichas baterías. En primer lugar se va a proceder a ahondar en los distintos tipos de las mismas que podemos encontrar en el mercado actual, estudiaremos los requerimientos que se nos presentan, y analizaremos cuál o cuáles de ellas se ajustan a las especificaciones exigidas para nuestro caso particular.

En concreto, buscamos unas baterías que sean capaces de ofrecer una alta energía específica junto con un alto voltaje, esto es así debido a que cuanto mayor voltaje dispongamos, menor será el amperaje, y por lo tanto serán menores las pérdidas y mayor la potencia transmitida. Además se buscarán otras características adicionales, como un ciclo de vida lo más largo posible, que no presente efecto memoria y que la carga se pueda efectuar lo más rápido posible.

Una vez hecho esto, se procederá a diseñar el pack de baterías a partir de los datos del fabricante. Para ello, nos ayudaremos del programa de diseño Pro-Engineer. Esta parte se completará con los cálculos pertinentes sobre el calor generado y las



necesidades de refrigeración. Asimismo, esta parte también será realizada con un programa de ordenador, llamado Femap, que nos permitirá realizar el análisis de las temperaturas en las celdas de la batería.

Finalmente, se procederá a exponer los resultados y las conclusiones obtenidas.



## 2. INTRODUCCIÓN

## 2. INTRODUCCIÓN.

En suma, este documento se estructura de la siguiente forma:

- En el capítulo 3 se introducen los conceptos e ideas más importantes para entender este documento, tales como el estado del arte, en cuanto a las tecnologías de baterías disponibles, los vehículos eléctricos actualmente y otros conceptos de interés.
- En el capítulo 4 se especifican los parámetros de diseño, en función de los controladores típicos y de los requerimientos de potencia.
- En el capítulo 5 se procederá al análisis y elección del fabricante y el modelo de celda más adecuado.
- En el capítulo 6 se abordará el diseño pormenorizado del pack de baterías, que se finalizará con su diseño con Pro-Engineer.
- En el capítulo 7 se evalúa la generación de calor utilizando el programa Femap.
- En el capítulo 8 se presenta un presupuesto del proyecto realizado.
- Finalmente, en el capítulo 9 se exponen las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de este Proyecto Fin de Carrera.
- El documento se completa con los anexos, la bibliografía consultada y las referencias.



### **3. ESTADO DEL ARTE**

### 3. ESTADO DEL ARTE.

Las baterías son el elemento más caro, voluminoso y pesado de un vehículo eléctrico. Por lo tanto, el conocimiento de las mismas en profundidad se considera de gran importancia. En este capítulo, ahondaremos en diferentes aspectos de las mismas.

Una batería es un acumulador o un conjunto de varios acumuladores de electricidad, es decir, un dispositivo capaz de almacenar energía eléctrica usando procedimientos electroquímicos. Inicialmente, se puede comenzar clasificando las baterías en función de la posibilidad que tienen de ser recargadas una vez que han sido descargadas. En este sentido se pueden definir las baterías primarias, que no permiten su recarga; y las baterías secundarias, que sí pueden ser recargadas. Para el objetivo de este proyecto, nos centraremos en el segundo grupo, el de las baterías secundarias o recargables, donde el proceso electroquímico es reversible, ya que los elementos químicos implicados en el proceso no se consumen, por lo que las baterías pueden cargarse y descargarse un determinado número de veces.

Un acumulador es un dispositivo que consta, en general, de dos electrodos, del mismo o de distinto material, sumergidos en un electrolito. Un electrólito o electrolito es cualquier sustancia que contiene iones libres, que se comportan como un medio conductor eléctrico. Debido a que generalmente se componen de iones en solución, los electrólitos también son conocidos como soluciones iónicas, pero también son posibles electrólitos fundidos y electrólitos sólidos. En términos simples, el electrólito es un material que se disuelve en agua para producir una solución que conduce una corriente eléctrica.

Todas las baterías son similares en su construcción y están compuestas por un determinado número de celdas electroquímicas. Cada una de estas celdas está compuesta de un electrodo positivo y otro negativo, además de un separador. Cuando dos electrodos apropiados se sumergen en un electrolito, un exceso de electrones aparece en un electrodo (negativo) y una deficiencia en el otro (positivo). La diferencia



de potencial eléctrico entre los dos electrodos origina el flujo de una corriente eléctrica en un circuito externo que vincula a los dos electrodos. El flujo de electrones, por tanto, se produce de negativo a positivo. Por tanto, durante el cierre del circuito externo, tendrá lugar el proceso de descarga, y durante la aplicación de una corriente, igualmente externa, tendrá lugar la carga de la batería.

Típicamente, el electrodo negativo está formado por un metal base y el electrodo positivo está compuesto por un óxido metálico. No obstante, esta definición no es tan restrictiva ya que existen muchas combinaciones de elementos y compuestos que en presencia de algún tipo de electrolito pueden producir corriente eléctrica. En este documento se refieren únicamente las principales combinaciones de elementos que actualmente se comercializan o están en investigación.

Todos los componentes de las celdas descritos anteriormente van recogidos en un contenedor, encargado de proporcionar el soporte y la rigidez mecánica necesaria para el funcionamiento de la batería. En cada uno de ellos se pueden interconectar varias celdas para proporcionar una determinada capacidad y/o tensión, denominándose al conjunto batería o monobloque.

### **3.1. PARÁMETROS IMPORTANTES DE LAS BATERÍAS.**

A la hora de decantarnos por un tipo de batería, para una determinada aplicación, es necesario conocer los valores de varios parámetros, para saber si se ajustarán a las necesidades solicitadas. Por lo tanto, a continuación se describen los principales parámetros implicados:

- La tensión proporcionada por cada elemento (celda) es determinante para elegir un tipo u otro de batería. Combinando las baterías en serie y/o paralelo podremos obtener el potencial deseado.
- La cantidad de carga eléctrica que es capaz de almacenar o suministrar se denomina capacidad, y también será un factor determinante a la hora de decantarse por un tipo u otro de batería, puesto que en ocasiones se requieren unas solicitudes especiales, como por ejemplo, en el arranque de los motores, donde se exigen elevadas corrientes. Se mide en Amperios-hora (la corriente máxima obtenible). La capacidad eléctrica hace referencia a los tiempos de carga y descarga, y se mide en Culombios, que es una unidad equivalente a la cantidad de carga transportada durante un segundo por una corriente de un Amperio, de manera que  $1Ah=3.600\text{ C}$ .
- La energía que es capaz de suministrar una batería se mide en Vatios-hora.
- La energía específica o energía por masa, es un ratio que nos permite comparar los diferentes tipos de baterías en función de la energía que puede suministrar, con relación a su peso. Se medirá en W-h/Kg.
- La densidad energética es un ratio que involucra el volumen ocupado. Se mide en W-h/litro.
- El número de ciclos de carga y descarga que pueden soportar manteniendo un alto porcentaje de la capacidad completa de almacenar energía (valor nominal), que disponía en un principio. Es un indicativo de la duración de la batería, es decir, de su ciclo de vida.



- El tiempo de carga y descarga. La batería no almacena toda la energía eléctrica que recibe por lo que la cantidad de electricidad suministrada debe ser mayor que la teóricamente necesaria. Trabajando entre 5°C y 25°C el factor de carga es de 1,4, es decir debe suministrarse una carga que sea un 40% superior a la deseada.
- El tiempo de auto-descarga, es decir, la pérdida de capacidad de una batería cuando se mantiene en circuito abierto. Para medirlo se utiliza el porcentaje de la carga que pierde por cada unidad de tiempo, por ejemplo, cada mes. En cualquier caso el ritmo de auto-descarga aumenta con la temperatura.
- El rango de temperaturas a los que el funcionamiento es óptimo, es decir, aquel en el que la batería puede funcionar regularmente y sin daños.

### **3.2. EFECTO MEMORIA.**

El efecto memoria es un fenómeno que reduce la capacidad de las baterías. Se produce cuando se carga una batería sin haber sido descargada del todo: se crean cristales en el interior de estas baterías, a causa de una reacción química al calentarse la batería, bien por uso o por las malas cargas. Este efecto consiste en que la batería parece «recordar» el nivel de carga que tenía cuando se comienza a recargar, de forma que al utilizarse nuevamente, sólo se descarga hasta dicho nivel, disminuyendo obviamente su tiempo de uso. Para prevenirlo no hace falta esperar a descargar totalmente la batería antes de realizar una carga; basta con que una de cada pocas cargas sea completa.

Existen cargadores en el mercado, que realizan una ecualización en las baterías; hacen una carga muy lenta, para cargar la batería hasta su máxima carga real. Las baterías que tienen efecto memoria son:

- Batería de Ni-Cd.
- Batería de Ni-MH (menor efecto que la anterior).

Las baterías que no tienen efecto memoria son:

- Batería de plomo y ácido.
- Batería de iones de litio.

También en las baterías sin efecto memoria se recomienda una descarga completa y carga completa de vez en cuando. En las de litio se recomienda una vez al mes si se usan habitualmente.

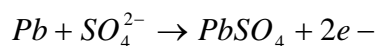
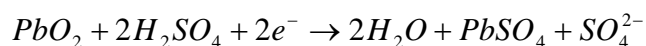
Las baterías de Li-Po, no se deben descargar por debajo de cierto valor porque dejan de funcionar, y no se deben cargar más de lo normal porque explotan, sin embargo, no tienen efecto memoria.

Otras baterías no químicas tampoco tienen ningún efecto memoria, como por ejemplo los condensadores de alta capacidad.

### 3.3. **TECNOLOGÍAS DISPONIBLES. TIPOS DE BATERÍAS.**

En primer lugar vamos a revisar los diferentes tipos de baterías de las que disponemos en el mercado.

- **BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO (O ACUMULADORES DE PLOMO):** Es uno de los tipos de baterías más utilizados en la actualidad, principalmente en los automóviles, y esto es así porque el plomo es un material relativamente barato, y que se puede encontrar con facilidad. Por ello, una de sus principales ventajas es que resultan económicas. En contra, podríamos aducir su gran peso. El material activo de la placa positiva es óxido de plomo ( $PbO_2$ ). El de la placa negativa es plomo puro esponjoso y el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Los electrones intercambiados se aprovechan en forma de corriente eléctrica por un circuito externo. Los procesos elementales que transcurren son los siguientes:



En la descarga baja la concentración del ácido sulfúrico, porque se crea plomo (II) y aumenta la cantidad de agua liberada en la reacción. Como el ácido sulfúrico concentrado tiene una densidad superior a la del ácido sulfúrico diluido, la densidad del ácido puede servir de indicador para el estado de carga del dispositivo.

No obstante, este proceso no se puede repetir indefinidamente, porque, cuando el sulfato de plomo (II) forma cristales muy grandes, ya no responden bien a los procesos indicados, con lo que se pierde la característica esencial de la reversibilidad. Se dice entonces que el acumulador se ha sulfatado y es necesario sustituirlo por otro nuevo.

Este proceso tiene lugar cuando la batería se deja descargada por un período de tiempo prolongado (más de dos semanas).

Ventajas de esta tecnología:

- Tecnología totalmente establecida.
- Alta eficiencia.
- Su tasa de auto-descarga mensual es de las más bajas, de aproximadamente un 5%.
- El voltaje ofrecido es de 2 Voltios/celda.
- No necesita mantenimiento.

Desventajas:

- Su energía específica es de aproximadamente 30-50 Wh/kg, una tasa bastante baja, que se usa para cubrir las necesidades de arranque, iluminación e ignición, ya que no es lo suficientemente grande como para mover el coche (en este caso se denominan baterías SLI: Starting, Lighting and Ignition).
  - Peso elevado.
  - Largos períodos de recarga.
  - Corta vida cíclica: 500-600 ciclos de carga-recarga.
- 
- BATERÍAS DE NÍQUEL-CADMIO: Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de un compuesto de cadmio, separados entre sí por un electrolito de hidróxido de potasa. Llevan también un separador situado entre el electrodo positivo y la envoltura exterior y un aislante que las cierra herméticamente.

Ventajas de la tecnología de níquel-cadmio:

- Admiten un gran rango de temperaturas de funcionamiento (-40°C - 60°C).

- Energía específica es de 45-80 Wh/Kg.
- Vida cíclica larga (más de 1.500 ciclos).
- Fiables y robustas.
- Admiten sobrecargas, se pueden seguir cargando cuando ya no admiten más carga, aunque no la almacenan.

Desventajas de la tecnología de níquel-cadmio:

- El voltaje proporcionado es de 1,2V/celda.
  - Intensidad usual: 0.5 a 1.0 Amperios (en pilas tipo AA).
  - El llamado efecto memoria es muy alto.
  - Los materiales son muy tóxicos, lo que representa un grave perjuicio, ecológicamente hablando.
  - Sufren envejecimiento prematuro con el calor.
- BATERÍAS DE NÍQUEL-HIDRURO METÁLICO: El hidruro metálico de níquel (NiMH) se introdujo comercialmente en la última década del siglo XX. Tiene un rendimiento similar al de la batería de NiCd, siendo la principal diferencia que en la batería de NiMH se utiliza un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico, que la hace libre de cadmio, lo que conlleva una ventaja considerable con respecto a la toxicidad.

Ventajas de la tecnología de níquel-hidruro metálico:

- Energía específica elevada, por encima de 60-120 Wh/Kg.
- Son algo más ligeras que las de Níquel-Cadmio y no están tan sujetas al efecto memoria como éstas.

Desventajas de la tecnología de níquel-hidruro metálico:

- No admiten bien el frío o el calor extremo, reduciendo drásticamente la potencia eficaz que puede entregar.

- Voltaje proporcionado: 1,2V/celda.
  - La auto-descarga es elevada.
  - Vida media de aproximadamente 300-500 ciclos de carga.
  - Sufren envejecimiento prematuro con el calor.
  - Efecto memoria moderado.
- 
- **BATERÍAS DE IONES DE LITIO:** Las baterías de iones de litio (Li-Ion) utilizan un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, trifilina ( $\text{LiFePO}_4$ ) u óxido de manganeso. Permiten llegar a altas densidades de capacidad, y son muy ligeras. No admiten descargas completas, y sufren mucho cuando estas suceden por lo que suelen llevar acoplados circuitos protectores adicionales para conocer el estado de la batería, y evitar así tanto la carga excesiva, como la descarga completa. Al estar fabricadas con materiales inflamables, si se sobrecalientan pueden llegar a explotar, por ello son necesarios estos circuitos electrónicos adicionales, que obviamente, encarecen el producto. Además, como consecuencia de añadir dicha circuitería, los tiempos de auto-descarga se ven aumentados, rebajando la carga cuando la batería no está en uso, a una velocidad mayor de lo que debería. Aún siendo peligrosas, últimamente se ha avanzado mucho en este sentido, y en la actualidad se puede decir que dicha tecnología es suficientemente segura como para que no se produzcan las citadas explosiones. Apenas sufren el efecto memoria y pueden cargarse sin necesidad de estar descargadas completamente, sin reducción de su vida útil. No admiten bien los cambios de temperatura.

Otra desventaja de este tipo de baterías es que sufren un envejecimiento, como consecuencia de su uso. Este envejecimiento es consecuencia del calor que se genere en las celdas. Por tanto, el envejecimiento de la batería será más acusado con temperaturas elevadas del ambiente. Por ello se aconseja no exponerlas a estos



ambientes extremos, siendo lo recomendable una temperatura comprendida entre los 20 y los 25 °C, y nunca fuera de los límites recomendables de funcionamiento, que oscilan entre los 0°C y los 60°C. Para temperaturas mayores se observará una descarga progresiva mayor, lo que conduce a una pérdida de capacidad gradual e irreversible. La consecuencia principal del envejecimiento radica en que provoca que llegados a un número determinado de ciclos de carga, la batería no sea capaz de recargarse como lo hacía al principio, y que su autonomía se reduzca notablemente.

El envejecimiento de la batería de litio es inevitable, pero la velocidad a la que ocurre este proceso variará en función de cómo se cuide el dispositivo. Por tanto, para un mantenimiento básico se recomienda no descargarlas más de un 20%, y almacenarlas por tiempos prolongados con un estado de carga del 40%, y en sitios frescos.

Además, existe el fenómeno de la pasivación, que se produce cuando se deja la batería mucho tiempo sin usar o se hacen pequeñas cargas. La carga y descarga completa soluciona este efecto. La pasivación es una fina película de cloruro de litio (LiCl) en la superficie del ánodo (incluso es beneficiosa ya que evita su auto-descarga). Va desapareciendo conforme la batería va siendo usada. Si la pasivación es excesiva, podría caer el voltaje por debajo del de funcionamiento.

Dependiendo de la composición de las baterías de litio, las podemos encontrar de cobalto, de fosfato o de manganeso. Entre ellas presentan ligeras diferencias en sus propiedades.

#### Ventajas de la tecnología de ión-litio:

- Voltaje proporcionado: 3,3-3,8 V. (Notar que es la batería que proporciona mayor tensión).
- Elevada energía específica: aproximadamente 110-160 Wh/Kg.
- Efecto memoria prácticamente inexistente.

- Auto-descarga moderada.
- No está fabricada con productos tóxicos.

Desventajas de la tecnología de ión-litio:

- Problemas de ecualización y necesidad de circuitos electrónicos adicionales.
  - Las altas temperaturas son perjudiciales para su ciclo de vida, sufren envejecimiento prematuro con el calor.
  - Inflamabilidad, explosiones.
  - Vulnerable a sobrecargas y sobre descargas.
  - Pasivación.
- 
- **BATERÍAS DE POLÍMEROS DE LITIO:** Son muy parecidas a las baterías de iones de litio anteriormente explicadas. El Li-polímero se distingue de otros sistemas de batería en el tipo de electrólito usado. El diseño original, utiliza un electrólito sólido seco del polímero solamente. Este electrólito se asemeja al plástico, como la película que no conduce electricidad pero permite un intercambio de iones (los átomos o los grupos eléctricamente cargados de átomos). El electrólito del polímero substituye el separador poroso tradicional, que se empapa con el electrólito. Por lo tanto, aquí radica una de sus ventajas, junto con su bajo peso, su facilidad de empaquetamiento, su baja tasa de auto-descarga, la ausencia del efecto memoria y un elevado número de ciclos de carga. A continuación se muestra una tabla en la que se comparan tres tecnologías basadas en el litio:

| TECNOLOGÍA<br>CARACTERÍSTICAS | IÓN-LITIO  | POLÍMEROS DE LITIO   | POLÍMEROS DE LITIO METÁLICO                                   |
|-------------------------------|--|--|---|
| ÁNODO                         | Carbón   | Carbón   | litio   |
| ELECTROLITO                   | Líquido  | Poli-electrolito   | Poli-electrolito  |
| CÁTODO                        | Óxido metálico<br>(LiCoO <sub>2</sub> , LiNiO <sub>2</sub> ,<br>LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) | Óxido metálico<br>(LiCoO <sub>2</sub> , LiNiO <sub>2</sub> ,<br>LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) | Óxido metálico, azufre<br>orgánico (Polímeros<br>conductores) |
| TENSIÓN NOMINAL               | 3,7 V  | 3,7 V  | 2 V- 3,6 V  |
| DENSIDAD DE ENERGÍA           | Alta   | Alta   | Muy alta  |
| CICLO DE VIDA                 | Excelente  | Bueno  | Malo  |
| BAJAS TEMPERATURAS            | Bueno  | Medio  | Malo  |
| SEGURIDAD                     | Mala   | Media  | Buena   |
| FLEXIBILIDAD-TAMAÑO           | Mala   | Buena  | Buena   |

**Tabla 3-1: Comparación de las diferentes tecnologías basadas en litio.**

- **CONDENSADOR DE ALTA CAPACIDAD:** También son denominados súper-condensadores o ultra-condensadores. Este dispositivo se desarrolla con una tecnología diferente a los anteriores, las cuales estaban basadas en reacciones electroquímicas. Un capacitor es un elemento pasivo de circuito eléctrico con dos terminales formados por dos placas conductoras separadas por un aislante, donde se almacena energía eléctrica debido al paso de las corrientes de una placa a otra a través del aislante. Así que su principal característica es la de poder ofrecer una alta capacidad en un pequeño formato. Es capaz de absorber una gran cantidad de energía en un espacio de tiempo muy breve, lo que es especialmente bueno para los vehículos eléctricos, donde puntualmente

se necesiten requerimientos de energía mayores, como por ejemplo, en el arranque. Por esta misma razón, las cargas y descargas son muy rápidas, y además, tienen un ciclo de vida muy largo, como consecuencia de que no se producen reacciones químicas en las que los componentes se desgasten.

Se necesita conectarlos en serie para obtener altos voltajes y la densidad de energía es baja. Esta tecnología aún necesita mejorar, pues de momento tiene precios muy elevados.



**Figura 3-1. Diferentes formatos de ultra condensadores marca Maxwell.**

Ventajas de los condensadores de alta capacidad.

- Elevado número de ciclos de carga y descarga (del orden de millones).
- Alta eficiencia (mayor que el 97-98%).
- Alta potencia específica: 6 KW/kg.
- Velocidad de carga y descarga muy elevada.
- Pequeño tamaño.

Desventajas de los condensadores de alta capacidad.

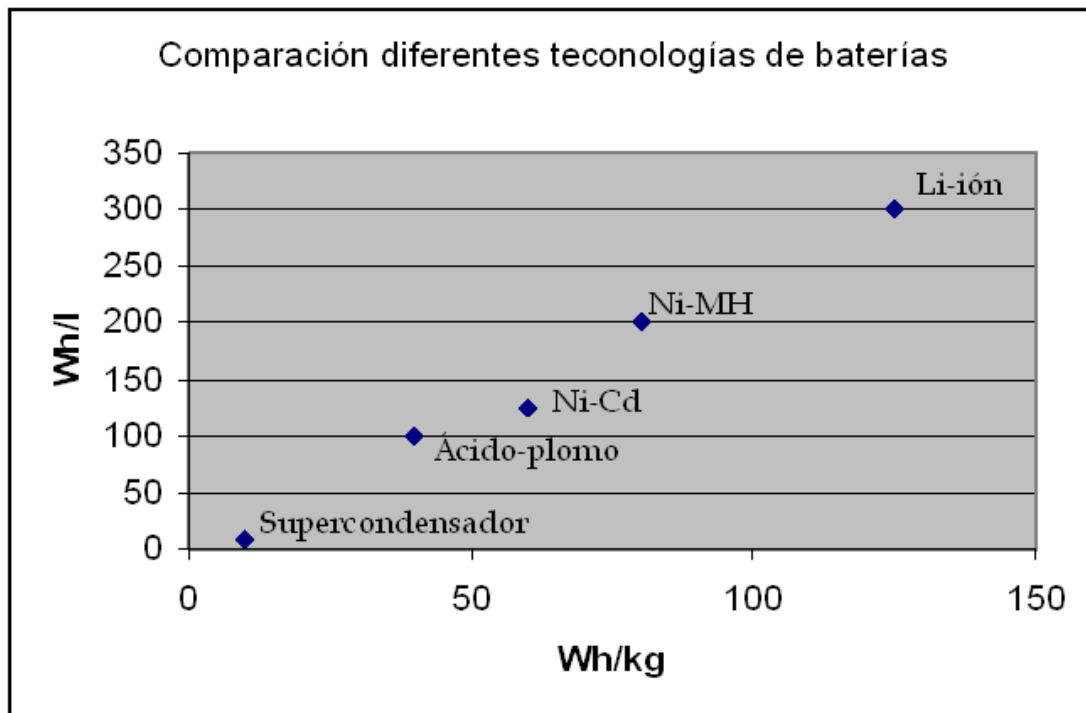
- Baja energía específica: 0,5-10 Wh/kg.
- Precio elevado.

A modo de resumen, y con la idea de clarificar los datos aportados anteriormente, a continuación se muestra una tabla con un resumen de los principales parámetros anteriores [1]:

| TECNOLOGÍA<br>PARÁMETROS  | PB-<br>ÁCIDO | NI-CD | NI-MH   | LI-IÓN   | LI-PO   | SÚPER-<br>CONDENSADORES |
|---|--------------|-------|---------|----------|---------|-------------------------|
| VOLTAJE (V/CELDA)   | 2            | 1,2   | 1,2     | 3,7      | 3.6-3.7 | 2-3                     |
| ENERGÍA ESPECÍFICA<br>(Wh/kg)                                       | 30-50        | 45-80 | 60-120  | 100-160  | 100-130 | 0,5-10                  |
| CICLOS DE VIDA (PARA<br>MANTENER EL 80% DE<br>SU CAPACIDAD INICIAL) | 500-600      | 1.500 | 300-500 | 500-1000 | 500     | >1.000.000              |
| AUTODESCARGA<br>(%/MES)   | 5            | 20    | 30      | 10       | 10      | 50                      |
| TIEMPO CARGA RÁPIDA<br>(Horas)                                      | 8-16         | 1     | 2-4     | 2-4      | 2-4     | <1                      |

**Tabla 3-2. Resumen de las características de diferentes tipos de baterías.**

Para completar el análisis, se ha realizado una gráfica para mostrar los datos de la energía específica [Wh/kg] y la densidad energética [Wh/l], de las diferentes tecnologías de las que se disponen, comparando los valores de cada una como se ve a continuación:



**Figura 3-2. Comparación de las diferentes tecnologías de baterías (Wh/l frente a Wh/Kg.).**

Con esta gráfica, podemos observar claramente que la batería más adecuada será la de ión-Litio, puesto que la batería será más ligera cuanto más a la derecha se encuentre en el eje de abscisas, y será de menor tamaño cuanto más arriba se encuentre posicionada en el eje de ordenadas. Por tanto, la batería de litio es la que mejores características tiene en cuanto a estos parámetros.

### **3.4. ELECCIÓN DE LA BATERÍA ADECUADA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.**

Una vez realizado el anterior análisis, estamos en condiciones de elegir el tipo de batería más adecuado para un vehículo eléctrico. Las características que buscamos son:

- Alta densidad de energía y alta energía específica para conseguir sistemas de dimensiones más reducidas y de menor peso.
- Alta eficiencia energética.
- Baja razón de auto-descarga, para minimizar las pérdidas.
- Larga vida útil, para compensar los costes iniciales.
- Independencia de las condiciones ambientales, que posibiliten un buen comportamiento ante variaciones climáticas extremas.
- Diseño robusto preparado para resistir sobrecargas eléctricas, vibraciones, golpes, etc.
- Diseño respetuoso con el medio ambiente.
- Bajo mantenimiento para reducir costes.
- Bajo coste.

Ninguna batería por sí sola reúne todos estos factores, por lo que a la hora de elegir se van a descartar las que por sus características no se ajusten a los factores deseables, y elegiremos la que ofrezca mejores prestaciones en conjunto.

En primer lugar, descartamos los condensadores de alta capacidad debido a que es una tecnología que aún no se encuentra madura para nuestro cometido, ni resulta económica. Por otra parte, como ya vimos, las baterías de Níquel-Cadmio y las de Níquel-Hidruro metálico llevan asociadas el inconveniente del efecto memoria, por lo que también se descartarán, al no poder ofrecernos sus condiciones óptimas de funcionamiento. Por tanto, vemos el abanico de posibilidades reducido a las baterías de ácido de plomo y a las de ión-Litio. Las de plomo, las vamos a descartar debido a su baja energía específica y a que no son aceptables para un número elevado de ciclos de



carga, con descargas profundas, por lo que, en consecuencia, optamos por las baterías de litio, como mejor opción para vehículos eléctricos.



### **3.5. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ACTUALES**

En primera instancia, para abordar este tema con la información suficiente, se plantean varias preguntas: ¿por qué decantarse por los coches eléctricos?, ¿cuáles son sus ventajas? Inicialmente, se pueden nombrar los beneficios medioambientales, ya que sus emisiones directas de contaminantes son nulas. Además, si la electricidad es producida mediante energías renovables, se consigue actuar de una manera sostenible con el medioambiente, por partida doble, por lo que las llamadas emisiones indirectas también serán nulas.

Otra de las ventajas de utilizar energía eléctrica radica en que se disminuye la tan costosa y peligrosa dependencia del petróleo extranjero, que la mayoría de los países tienen<sup>1</sup>. La energía eléctrica puede ser generada a partir de gas natural, petróleo, energía solar, eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica o nuclear, o una combinación de ellas.

Con los coches eléctricos, aparte de la contaminación del aire, también se reduce la contaminación acústica, porque son vehículos silenciosos, por lo que ésta, es otra gran baza a su favor.

Además, si se aduce la inferior autonomía de los vehículos eléctricos actuales frente a los de combustión interna, es necesario conocer el dato de que en Estados Unidos, el 80% de los desplazamientos diarios son inferiores a 80km., y más de la mitad son inferiores a 40km. En la Unión Europea, en 2007, según Eurostat, 460 millones de ciudadanos realizan en promedio tres desplazamientos, que totalizan 27km diarios en coche [3]. Por lo tanto, podemos afirmar con seguridad que existe un

---

<sup>1</sup> “El comportamiento inelástico de la demanda a los altos precios se debe a que, por el momento, no existen bienes sustitutivos comercializables a gran escala para los combustibles de automoción derivados del petróleo. Más del 95% del combustible utilizado por el sector transporte proviene del petróleo.” [2].

mercado potencial para los vehículos eléctricos, y que además cubriría las necesidades de una gran parte de los requerimientos personales de movilidad.

Por todo lo mencionado anteriormente, ya son muchas las empresas que se han aventurado a fabricar vehículos eléctricos. A continuación se muestran varios ejemplos de ello:

- La empresa Tesla Motors, situada en Silicon Valley, California, es una de las pioneras en la construcción y comercialización de coches eléctricos. El modelo Tesla Roadster se basa en un diseño del Lotus Elise, que posteriormente fue modificado, fabricándose su chasis con compuestos de fibras de carbono para dotarle de mayor ligereza. Es por ello por lo que, aún siendo ensamblado en la fábrica de Lotus en Hethel (Reino Unido), el coche comparte con el Lotus Elise menos del 7% de las partes. Sus coches son capaces de acelerar de 0 a 100 Km. /hora en 3.9 segundos y disponen de una autonomía de 360 Km. por cada recarga de la batería. La carga se puede hacer a 120V, 240 V ó 480 V. El fabricante apunta que se puede hacer una carga rápida en 45 minutos, o un cambio de la batería en 5 minutos.



**Figura 3-3. Tesla Roadster y detalle del cargador.**

- Reva es el coche eléctrico urbano más vendido del mundo, y se autodefine como eléctrico, económico y ecológico. Es fabricado por la empresa india Reva Electric Car Co. Es un vehículo pequeño de tres puertas, diseñado para uso urbano, y con capacidad para tres personas. Actualmente, se puede elegir entre el modelo con baterías de plomo ácido, y otro con baterías de Li-ión, que ofrecen una autonomía máxima de 80km y 120km, respectivamente.



**Figura 3-4. Reva.**

- Vectrix es una empresa dedicada a la fabricación de motocicletas eléctricas, con una potencia máxima de 27 CV (20 KW), que pueden alcanzar velocidades en torno a los 100Km/hora. Las baterías empleadas son las de Níquel-Metal Hidruro, para las que son necesarias cargadores de 110-230 V, y 1,5 KW, que se acoplará a las tomas de corriente

ordinarias. El tiempo de carga oscila entre 3 y 5 horas, dependiendo del estado inicial de la carga. La autonomía de la que nos habla el fabricante es de aproximadamente 110 Km. para un uso urbano. Otra de las ventajas a reseñar de estos modelos es que están compuestas por menos piezas que las motocicletas o scooters comunes, con motor de combustión interna, lo que las hace más robustas frente a fallos de los diferentes elementos, y les proporciona unos requerimientos de mantenimiento mínimos (el motor no necesita mantenimiento, y los diferentes elementos no sufren desgaste).



**Figura 3-5. Motocicleta Vectrix VX-1.**

- Brammo es una empresa ubicada en Oregón (EE.UU.) que ha desarrollado una motocicleta eléctrica, llamada Enertia. Ésta, está fabricada en parte por materiales reciclados, y la propia moto se puede reciclar en gran parte. Su potencia es de 13 KW y puede acelerar de 0-48 Km. /h en 3,8 segundos. Las baterías usadas son de Litio, de 3,1 KWh, y tardan en recargarse aproximadamente 4 horas, lo que las dota de una autonomía de aproximadamente 80km. El precio de venta ronda los 10-12.000€, de venta en EE.UU.



**Figura 3-6. Detalle de la recarga eléctrica, motocicleta Brammo Enertia.**



**Figura 3-7. Brammo Enertia.**

- La empresa Zero Motorcycles dispone de una gama de motocicletas eléctricas con las que pretenden aunar calidad y tecnología, sin descuidar la sostenibilidad. La fotografía que se muestra a continuación vemos el modelo “Zero S”, que puede alcanzar una velocidad máxima



de 90 km/h, con una autonomía de 80 km, y cuyo tiempo de recarga de la batería es inferior a cuatro horas.



**Figura 3-8. Motocicleta modelo Zero S, de Zero Motorcycles.**

- En respuesta a la demanda de los medios necesarios para cargar las baterías fuera de los domicilios particulares, han surgido empresas que facilitan la recarga en diferentes puntos, como en la vía pública o en parkings públicos y privados. Un ejemplo de ello, es CirCarLife, una empresa que presenta una serie de soluciones pensados para facilitar la citada carga de las baterías eléctricas. El usuario puede hacer uso de estas estaciones mediante unas tarjetas recargables, donde se acumula el saldo disponible. Los postes de recarga cuentan con las protecciones adecuadas para realizar las operaciones de carga con la mayor seguridad.



**Figura 3-9. Punto de recarga eléctrica, de la marca CirCarLife.**

- El Dodge Circuit EV fue presentado en el Salón de Detroit, en 2.009. Es un prototipo de un vehículo deportivo biplaza 100% eléctrico que

presentó la marca Chrysler, a partir del chasis del Lotus Europa. El Dodge Circuit EV es la versión actualizada del Dodge EV.



Figura 3-10. Dodge EV.



Figura 3-11. Detalle interior Dodge EV.

El motor del nuevo Dodge Circuit EV es de 200 kW, con una aceleración de 0-100 en menos de 5 segundos, y una velocidad máxima de 190 Km./h. La recarga mediante un enchufe normal dura 4 horas, y la autonomía obtenida es de 250-300 km.



**Figura 3-12. Dodge Circuit EV.**

- El Lightning GT (prototipo) es un deportivo creado por la empresa Lightning Car Company, dedicada en exclusiva a los coches eléctricos, que recurre a la nanotecnología para la alimentación de este coche, realizado en fibra de carbono. Tiene una autonomía de 320 km, con una aceleración de 0-100 en algo más de 4 segundos y una velocidad máxima autolimitada a 210 Km. /h. el precio con el que saldrá a la venta ronda los 200.000 €.





**Figura 3-13. Lightning GT.**

- Bereco es una marca española, creada en 2006, dedicada a la fabricación de vehículos eléctricos, generalmente de dos ruedas. En la actualidad, cuentan con varios modelos de ciclomotores, que dependiendo de cada modelo, presentan una autonomía de entre 35 y 120 kilómetros, y unas velocidades máximas comprendidas entre los 45 y los 100 km/hora.



**Figura 3-14. Motocicletas Bereco.**

### 3.6. **FABRICANTES.**

En este punto indagaremos un poco más sobre los fabricantes de baterías para coches eléctricos. Como ya se ha visto en apartados anteriores, las baterías que ofrecen mejores prestaciones para los vehículos eléctricos son las de litio. Así pues, nos centraremos en este tipo de tecnologías.

- A123systems es una empresa dedicada a la fabricación de baterías de ión-litio usando la nanotecnología, basándose en las investigaciones anteriormente desarrolladas por el MIT (Massachusetts Institute of Technology). Con esta tecnología se pretende conseguir un bajo coste por Vatio, y un alto voltaje suministrado por cada celda. En concreto, utilizan una tecnología de Nanofosfatos, con la que consiguen un ciclo de vida prolongado. Esta empresa nos ofrece varios formatos de celdas, tanto cilíndricas como prismáticas, entre ellas el que vemos en la figura de abajo, con un voltaje nominal de 3,3V y 20Ah.



**Figura 3-15. Celda prismática de la marca A123 Systems.**

Además, desde el año 2.000, la empresa A123 Systems tiene una filial, llamada Enerland, que se dedica al desarrollo y fabricación de baterías recargables, basándose en polímeros de litio, y de súper-condensadores.

- Altairnano es una empresa que fabrica soluciones de almacenamiento de energía ayudándose de la tecnología del ión-litio, pero que introduce un elemento en sustitución del grafito usado normalmente, el titanato de litio. Esta empresa ofrece celdas en dos formatos, de 11 Ah o 50 Ah, ambos con un voltaje de 2,3V.
- La empresa Valence ofrece unas baterías de litio ( $\text{LiFeMgPo}_4$ ) en un formato de tamaño igual a las baterías de plomo habituales. Se ofrecen dos series de baterías, la RT, destinada para aplicaciones de bajo voltaje (12,8V), y la serie XP (12,8V y 19,2V), para aplicaciones que necesiten mayores requerimientos de voltaje y capacidad. Además ofrece baterías de 3,2V/celda y 1.400mAh.
- Enertech International Inc. es una empresa coreana dedicada al diseño, fabricación y ensamblaje de baterías de litio. Ofrecen una amplia gama de celdas, y además tienen unas celdas específicas para grandes requerimientos de potencia y energía, que varían en voltaje (3,2 V ó 3,7 V) y en capacidad (4Ah-150Ah), según los requerimientos.
- Thunder Sky es una empresa china especializada en la fabricación de baterías de litio recargables que tienen como fin último el transporte. Dispone de una amplia gama de baterías.

- Kokam America es una empresa que dispone de una amplia gama de celdas de polímero de litio (desde 5 Ah- 240 Ah para los formatos de mayores requerimientos). Existe una gama especial, denominada Superior lithium polymer battery (SLPB), para coches eléctricos e híbridos. Además disponen de productos para conectar varias baterías, e información sobre cómo hacerlo.
- Electrovaya ofrece soluciones integrales basadas en celdas de litio. Disponen de varios formatos que varían entre 2 y 200Ah.
- Compact Power es una empresa subsidiaria de LG, dedicada en exclusiva al desarrollo de baterías de litio para vehículos eléctricos.
- LG Chem también dispone de varios formatos de celdas de baterías de litio, con una tensión de 3,7 V y capacidades en torno a los 900 mAh de media. Además, dispone de varias celdas desarrolladas específicamente para vehículos eléctricos, los modelos E1 y E2.
- Ukai es una gran empresa española que se dedica tanto a la electrónica de consumo como a la industrial. Disponen de una amplia gama de baterías de ión litio, tanto en formato prismático como en formato cilíndrico.
- EnerDel es una compañía norteamericana fabricante de celdas, packs y sistemas de almacenamiento de energía que utiliza diferentes tecnologías y tamaños de celdas.

### **3.7. COMPARACIÓN DE CELDAS PRISMÁTICAS FRENTE A CELDAS CILÍNDRICAS.**

El formato típico de los sistemas de almacenamiento de energía tradicionalmente ha sido el cilíndrico [4]. Actualmente, también disponemos de un formato prismático, que se ha desarrollado con las baterías de iones de litio. Es necesario aclarar que existen en el mercado los formatos prismáticos como tal, de carcasa rígida, y otros, que también son de formato prismático, pero que no disponen de una carcasa exterior rígida, sino flexible. Para diferenciarlas, estas últimas celdas son denominadas en inglés tipo “pouch”, que podríamos traducir como tipo “bolsa”, por su aspecto externo. Es a este último formato al que nos referimos cuando hablamos de celdas prismáticas.

Las celdas prismáticas (pouch) presentan el polímero laminado, para la construcción de la geometría plana. En este formato se pueden fabricar un gran espectro de tamaños, incluidos grandes formatos. Esta característica se conoce como escalabilidad, es decir, la capacidad de adaptarse a diferentes requerimientos de tamaño, sin perder calidad, y es fundamental para la fiabilidad de los sistemas de baterías de gran tamaño. Además, presenta otra gran ventaja, y es que el envase exterior, la carcasa como tal, es inexistente, por lo que su peso se reduce notablemente.

A continuación mostramos una tabla comparativa con las características más significativas de estos dos formatos.



|   | <b>CELDA PRISMÁTICA<br/>(pouch)</b>  | <b>CELDA CILÍNDRICA</b>   |
|---|--|---|
| <b>GRAN FORMATO /CAPACIDAD<br/>DE ESCALABILIDAD</b>                             | Excelente  | Limitada  |
| <b>CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS</b>   | Muy buenas   | Buenas en pequeñas celdas. Limitada en celdas más grandes.  |
| <b>SEGURIDAD (EN CUANTO A LA<br/>PRESIÓN ACUMULADA EN<br/>GRANDES FORMATOS)</b> | Intrínseca: pequeñas explosiones en el interior, que hacen que la celda deje de funcionar. | Requiere de ventilación en la construcción para liberar la presión. Presiones considerables pueden provocar la explosión de la celda. |
| <b>EFICIENCIA DEL EMBALAJE</b>  | Excelente: la construcción rectangular permite la maximización del uso del espacio.        | Varía con el tamaño del sistema. Los espacios entre los cilindros pueden provocar hasta un 22% de pérdida del volumen.                |
| <b>USOS COMUNES EN<br/>PRODUCTOS DE CONSUMO</b>                                 | Baterías de teléfono móvil.  | Herramientas eléctricas, baterías de ordenadores portátiles.  |
| <b>DISPONIBILIDAD.</b>  | Creciendo en popularidad.  | Muy frecuentes.   |

**Tabla 3-3. Comparación de los formatos de baterías cilíndricas y prismáticas.**



## **4. REQUERIMIENTOS DE POTENCIA. CONTROLADORES.**

## 4. CONTROLADORES.

Se hace necesario incluir un apartado sobre controladores en este documento, porque aunque no pertenece al argumento central del proyecto, nos es indispensable para conocer las características del conjunto de baterías integrantes en el vehículo eléctrico. Dicho conjunto tendrá que disponer de una tensión semejante a la entrada que el controlador necesita para trabajar en condiciones adecuadas.

El controlador, de manera simplificada, es aquél artificio capaz de recoger la energía almacenada en las baterías, y entregárselo al motor, para el correcto funcionamiento del vehículo. Hoy en día, existen muchos fabricantes de controladores. Por ello, en este documento nos vamos a centrar en estudiar dos de los controladores más utilizados normalmente.

Concretamente, se han estudiado los controladores de la marca UQM Technologies y los de la marca Sevcon.

La marca UQM Technologies ofrece una amplia gama de motores, generadores y controladores para vehículos híbridos y eléctricos. Para nuestro cometido, bastará con seleccionar el conjunto de motor-controlador modelo PowerPhase 75, que es capaz de ofrecer una potencia de 45 kW en continuo y 75 kW de pico [5]. La tecnología usada por el controlador se basa en la configuración de medio puente de IGBT's. De esta configuración, se montarán tres de ellos.



**Figura 4-1: Controlador UQM PowerPhase 75.**

Por su parte, la empresa Sevcon ofrece una amplia gama de productos para vehículos eléctricos. Entre los controladores que se ofertan, buscaremos aquéllos que



ofrezcan la mayor tensión posible de entrada, para así poder tener unos valores de intensidad menores, y, por ello, aumentar la eficiencia y reducir las pérdidas. Los controladores que más se ajustan a lo comentado en líneas anteriores son los de la serie Gen4, concretamente, la serie G80 (modelos G8018, G8035 y G8055). Estos modelos, presentan una entrada de tensión de 72-80 VDC, y la intensidad varía en los tres modelos disponibles [6].



**Figura 4-2: Controladores de la marca Sevcon.**

Con la siguiente tabla se va a proceder a comparar los controladores de ambas marcas:

| FABRICANTE            | Tensión mínima de entrada (V) | Tensión máxima de entrada (V) | Corriente máxima de entrada (I) |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| UQM<br>PowerPhase 75. | 240                           | 420                           | 400                             |
| Sevcon Gen4<br>G8018. | 72                            | 80                            | 180                             |
| Sevcon Gen4<br>G8035. | 72                            | 80                            | 350                             |
| Sevcon Gen4<br>G8055. | 72                            | 80                            | 550                             |

**Tabla 4-1: Comparación de características de controladores UQM PowerPhase 75 y Sevcon Gen4.**

En este punto, podemos comparar los dos controladores anteriores, para una misma potencia. Si, por ejemplo, buscamos una potencia de 45 kW:

- Con el controlador UQM, a su máxima tensión de entrada, es decir, 420 V, trabajaría a una intensidad de 107 A.
- Con el controlador de Sevcon, a su máxima tensión de entrada, es decir, 80 V, trabajaría a una intensidad de 562,5 A.

Con este sencillo ejemplo, podemos ver claramente que el resultado obtenido para el fabricante Sevcon presenta una corriente elevadísima, y sólo uno de los modelos, el G8055, podría soportarla durante dos minutos.

Esta corriente tan alta, incide radicalmente en la eficiencia, pues es sabido que mayores corrientes, provocan mayores pérdidas, y, como consecuencia, disminuye la eficiencia.

La diferencia en la eficiencia reside en la manera en la que están regulados estos controladores, pues el UQM, como ya hemos visto, utiliza IGBT's, y el controlador de Sevcon utiliza Mosfet' s. La explicación reside en que el Mosfet es mejor para tensiones bajas (inferiores a 250V), y el IGBT es mejor para trabajar a tensiones mayores, y a altas potencias, con menores pérdidas.



Con este sencillo ejemplo hemos demostrado cómo sería más adecuado para nuestro propósito el controlador PowerPhase 75, de la marca UQM. Por tanto, los requerimientos de potencia, tensión e intensidad que tendrán las baterías seleccionadas deberán adecuarse a este controlador:

- La tensión de entrada al mismo oscilará entre 240V y 420 V.
- La intensidad deberá ser menor de 400 A.



## **5. ANÁLISIS DE LAS CELDAS.**

## 5. ANÁLISIS DE LAS CELDAS.

El primer paso en la elección del modelo de celdas más adecuado para nuestro cometido, consiste en buscar y analizar los diferentes tipos de celdas de los que disponemos en el mercado, que se puedan ajustar a nuestras necesidades. Los modelos analizados se muestran en la siguiente tabla:

| MODELO                        | nº de celdas | Voltaje/celda (V) | Voltaje total (V) | Capacidad (Ah) | Peso/celda (grs.) | Wh/celda  | Wh/Kg. |
|-------------------------------|--------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|-----------|--------|
| Altairnano 50Ah               | 21           | 2,3               | 48,3              | 50             | 1600              | 1014      | 72     |
| Altairnano 11Ah               | 85           | 2,3               | 195,5             | 11             | 366               | 16618     | 69     |
| Valence cilíndrica            | 837          | 3,2               | 2678,4            | 1,4            | 40                | 2241821   | 112    |
| A123 Anr 26650 M1a cilíndrica | 404          | 3,3               | 1333,2            | 2,3            | 70                | 538613    | 108    |
| LG Chem E1                    | 130          | 3,85              | 500,5             | 10             | 245               | 65065     | 157    |
| LG Chem E2                    | 204          | 3,8               | 775,2             | 6              | 160               | 158141    | 143    |
| Enertech SPB 451835a1         | 6350         | 3,7               | 23495             | 0,2            | 4,6               | 149193250 | 161    |
| Enertech SPB 9345136 UH1      | 302          | 3,7               | 1117,4            | 4,4            | 120               | 337455    | 136    |
| Ukai LIR 063450A              | 1671         | 3,7               | 6182,7            | 1,05           | 23,8              | 10331292  | 163    |
| Ukai LIR 103450A              | 1019         | 3,7               | 3770,3            | 1,8            | 41,2              | 3841936   | 162    |
| Ukai LIR 18650                | 843          | 3,7               | 3119,1            | 2,2            | 49                | 2629401   | 166    |
| Ukai 8867220 Fullwatt         | 139          | 3,7               | 514,3             | 9,7            | 258               | 36        | 139    |
| Ukai 167062 Fullwatt          | 263          | 3,7               | 973,1             | 6              | 130               | 22        | 171    |
| KOKAM SLPB 55205130H          | 112          | 3,7               | 414,4             | 11             | 292               | 46413     | 139    |
| KOKAM SLPB 160460330          | 8            | 3,7               | 29,6              | 240            | 5000              | 237       | 178    |
| KOKAM SLPB 53460330           | 23           | 3,7               | 85,1              | 70             | 1700              | 1957      | 152    |
| KOKAM SLPB 70460330           | 17           | 3,7               | 62,9              | 100            | 2320              | 1069      | 159    |
| KOKAM SLPB 140460330          | 9            | 3,7               | 33,3              | 200            | 4440              | 300       | 167    |
| KOKAM SLPB 75106205           | 111          | 3,7               | 410,7             | 16             | 330               | 45588     | 179    |
| KOKAM SLPB 75106100           | 227          | 3,7               | 839,9             | 7,5            | 155               | 190657    | 179    |
| Enerland PQ 0300XP            | 4059         | 3,7               | 15018             | 0,3            | 8,2               | 60959280  | 135    |
| Enerland PQ 0800XP            | 960          | 3,7               | 3552              | 0,8            | 23                | 3409920   | 129    |
| Enerland PQ-4500XQ            | 346          | 3,7               | 1280,2            | 4,5            | 112               | 442949    | 149    |
| Enerland PQ-6000XP            | 262          | 3,7               | 969,4             | 6              | 147               | 253983    | 151    |
| Enerland PQ-5350LP            | 338          | 3,7               | 1250,6            | 5,35           | 110               | 422703    | 180    |
| Gaia Hp 602030 NCA            | 22           | 3,6               | 79,2              | 45             | 1500              | 1742      | 108    |
| Gaia HE 602030 NCA            | 22           | 3,6               | 79,2              | 55             | 1500              | 1742      | 132    |
| Gaia Hp 601300 NCA            | 32           | 3,6               | 115,2             | 27             | 980               | 3686      | 99     |

**Tabla 5-1: Datos sobre diferentes modelos de celdas.**



Para la realización de la tabla se ha tenido en cuenta el espacio del que disponemos para la colocación de las baterías, y, con ello, según el volumen ocupado por cada celda, se ha calculado el número de las mismas que se podrían incluir en el pack. En principio, los cálculos se han realizado para un volumen de  $18 \text{ dm}^3$ . A continuación se ha calculado el voltaje total que entregaría el pack de celdas, y la capacidad de las mismas. Con estos datos, es posible obtener los Vatios-hora totales del conjunto y también los Wh/Kg. Este último dato nos será de gran ayuda para comparar las distintas celdas.

En esta tabla, se muestran los parámetros más importantes para realizar la elección del conjunto de celdas más adecuado. No obstante, por su interés, se adjunta en el anexo I, al final del documento, una tabla ampliada con otros detalles de los diferentes modelos.

## **5.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN.**

A continuación nos disponemos a elegir una de las celdas anteriormente citadas. Podemos hacer una diferenciación entre criterios cualitativos y cuantitativos. En primer lugar, y, a partir de los valores obtenidos en la tabla, se podrán analizar y comparar las diferentes celdas, según los siguientes criterios cuantitativos:

- **Peso.** El peso ha de estar proporcionado al vehículo, puesto que no conviene instalar unas baterías demasiado pesadas.
- **Precio.** Dado que a priori no se dispone de la información necesaria sobre el precio de las celdas, no se ha considerado este criterio para la selección de las mismas.
- **Rapidez de carga y descarga.** Ambos criterios son muy importantes, pues tienen que ver directamente con la carga de la que dispondrá el pack en cuestión, y con el tiempo que será necesario para recargar las baterías. Para ello, el fabricante pone a nuestra disposición curvas de carga y descarga.
- **Energía entregada (Wh).** Serán necesarias unas baterías que sean capaces de ajustarse a los requerimientos de potencia del motor y del controlador del vehículo. Este criterio es uno de los más importantes a la hora de comparar a los diferentes fabricantes, y uno de los más decisivos a la hora de decantarnos por uno u otro modelo. Por ello, buscaremos aquél conjunto que sea capaz de entregar la mayor potencia por unidad de tiempo.
- **Energía específica (Wh/Kg.).** Este dato es sumamente útil para poder comparar los distintos tipos de celdas. Buscaremos una energía específica lo más alta posible.
- **Densidad de energía (Wh/l.).** Este parámetro, nos ofrece la energía que es capaz de almacenar por unidad de volumen, por lo que va ligado al tamaño final que tendrá la batería. Los vehículos dispondrán de un

espacio específico para la ubicación de las baterías. Es por ello, por lo que aún cumpliendo con el resto de criterios, si una batería ocupa un espacio mayor al designado, será rechazada.

- Tensión. La tensión será muy importante, pues necesitamos que las baterías entreguen al controlador un rango de tensiones determinado, para funcionar correctamente. Esta tensión vendrá determinada por la colocación en serie de las baterías.
- Ciclo de vida. Se tratará de buscar baterías que sean capaces de aguantar el mayor número de ciclos de carga y descarga posibles. Esto, inequívocamente, conduce a un mayor tiempo de vida de la batería, manteniendo su capacidad de almacenamiento de energía inicial. Asimismo, mayores ciclos de vida conducen a una reducción de los costes iniciales.
- Auto-descarga. Este criterio será útil para complementar a las características de una batería. Buscaremos una tasa de auto-descarga baja, para evitar que la batería se descargue cuando no se utilice el vehículo, y así disponer del mismo para su uso en todo momento.

Adicionalmente, los criterios cualitativos, nos serán de gran ayuda, pues si no se cumpliera alguno de ellos, las celdas serían eliminadas de nuestro análisis automáticamente. Los criterios cualitativos que se van a seguir son los siguientes:

- Disponibilidad. En el mercado existen multitud de ofertas, pero debemos asegurarnos de que el fabricante puede suministrarnos las baterías requeridas sin impedimentos de ningún tipo. Actualmente, muchos son los fabricantes que se dedican a desarrollar y fabricar estos productos. Sin embargo, algunos de ellos mantienen acuerdos de exclusividad con otras empresas fabricantes de vehículos eléctricos, otras disponen de patentes, y en otros casos nos encontramos con la problemática de que sólo sirven sus productos en grandes lotes.
- Seguridad. Debemos tener la certeza de que las celdas sean seguras. Para ello, el fabricante suele proporcionarnos datos útiles sobre





condiciones normales de funcionamiento (Tensiones, intensidades, temperaturas,...), y valores que nunca han de sobrepasarse.

Si alguno de estos criterios anteriores no se cumpliera, no se podría trabajar con ese tipo de celdas, por lo que se descartaría.

## 5.2. ELECCIÓN DE LA CELDA.

Una vez que hemos estudiado los diferentes tipos de celdas que podemos encontrar en el mercado, y que se ajustan a nuestro propósito, estamos en disposición de elegir una de ellas, teniendo en cuenta los criterios anteriormente explicados.

A partir de la tabla número **5-1**, podemos hacer una primera selección de celdas en función de la energía específica que presentan. Este criterio, es uno de los más importantes, y por eso se escoge el primero, pues en él redundará la eficiencia de las baterías, que, como ya hemos dicho en otras ocasiones, son el elemento primordial del vehículo eléctrico (por ser el elemento más pesado, más caro y que ocupa mayor volumen). Guiándonos por este criterio, las celdas que mayor energía específica presentan son las de los fabricantes y modelos detallados a continuación<sup>2</sup>:

| FABRICANTE Y MODELO   | nº de celdas | Voltaje/celda (v) | Voltaje total (v) | Capacidad (Ah) | Peso/ celda (grs.) | Wh/ celda | Wh/Kg |
|-----------------------|--------------|-------------------|-------------------|----------------|--------------------|-----------|-------|
| LG Chem E1            | 130          | 3,85              | 500,5             | 10             | 245                | 38,5      | 157,1 |
| Enertech SPB 451835a1 | 6350         | 3,7               | 23495             | 0,2            | 4,6                | 0,7       | 160,9 |
| Ukai LIR 063450A      | 1671         | 3,7               | 6182,7            | 1,05           | 23,8               | 3,9       | 163,2 |
| Ukai LIR 103450A      | 1019         | 3,7               | 3770,3            | 1,8            | 41,2               | 6,7       | 161,7 |
| Ukai LIR 18650        | 843          | 3,7               | 3119,1            | 2,2            | 49                 | 8,1       | 166,1 |
| Ukai 167062 Fullwatt  | 263          | 3,7               | 973,1             | 6              | 130                | 22,2      | 170,8 |
| KOKAM SLPB 160460330  | 8            | 3,7               | 29,6              | 240            | 5000               | 888,0     | 177,6 |
| KOKAM SLPB 53460330   | 23           | 3,7               | 85,1              | 70             | 1700               | 259,0     | 152,4 |
| KOKAM SLPB 70460330   | 17           | 3,7               | 62,9              | 100            | 2320               | 370,0     | 159,5 |
| KOKAM SLPB 140460330  | 9            | 3,7               | 33,3              | 200            | 4440               | 740,0     | 166,7 |
| KOKAM SLPB 75106205   | 111          | 3,7               | 410,7             | 16             | 330                | 59,2      | 179,4 |
| KOKAM SLPB 75106100   | 227          | 3,7               | 839,9             | 7,5            | 155                | 27,8      | 179,0 |
| Enerland PQ-6000XP    | 262          | 3,7               | 969,4             | 6              | 147                | 22,2      | 151,0 |
| Enerland PQ-5350LP    | 338          | 3,7               | 1250,6            | 5,35           | 110                | 19,8      | 180,0 |

**Tabla 5-2: Modelos de celdas con energía específica >150Wh/kg.**

<sup>2</sup> Se han escogido las celdas con una energía específica mayor de 150Wh/Kg.

De estas celdas, podemos eliminar varias de nuestro análisis, por varios motivos que a continuación se detallan:

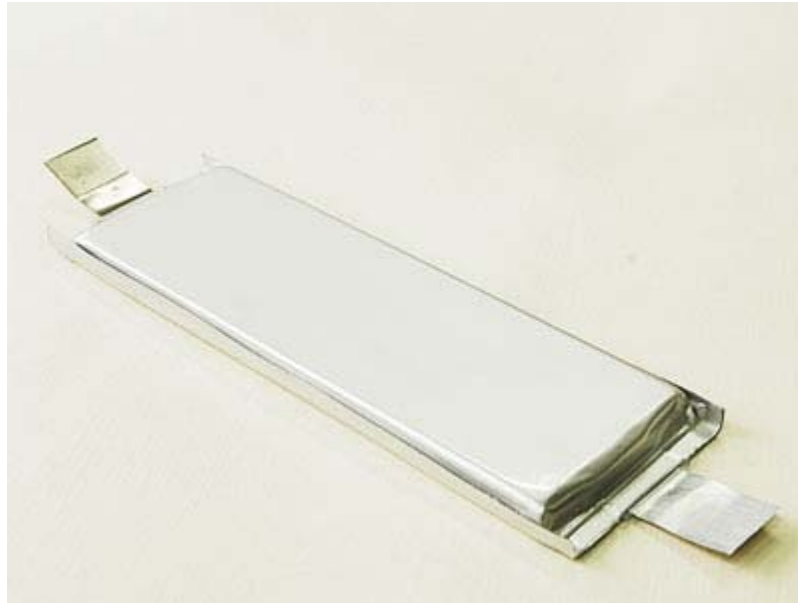
- Las celdas de LG Chem, se eliminan por falta de datos como los de carga, descarga y auto-descarga, y por falta de disponibilidad.
- Las celdas de Enertech se eliminan porque al ser demasiado pequeñas, hay que ensamblar más de 6.000 celdas para obtener el potencial deseado.

Después de esta simplificación, nos quedan únicamente tres fabricantes, Ukai, Kokam y Enerland. Comparando los modelos de cada marca entre sí, y buscando siempre el mayor voltaje y la mayor energía específica, seleccionamos el mejor modelo de cada fabricante:

| FABRICANTE Y MODELO  | nº de celdas | Voltaje/celda (v) | Voltaje total (v) | Capacidad(Ah) | Peso/celda (grs) | Wh/celda | Wh total | Wh/kg |
|----------------------|--------------|-------------------|-------------------|---------------|------------------|----------|----------|-------|
| Ukai 167062 Fullwatt | 263          | 3,7               | 973,1             | 6             | 130              | 22,2     | 5838,6   | 170,8 |
| KOKAM SLPB 75106205  | 111          | 3,7               | 410,7             | 16            | 330              | 59,2     | 6571,2   | 179,4 |
| Enerland PQ-5350LP   | 338          | 3,7               | 1250,6            | 5,35          | 110              | 19,8     | 6690,7   | 180,0 |

**Tabla 5-3: Mejores modelos de cada fabricante seleccionado.**

En este punto, para decidirnos entre una u otra celda, miraremos la impedancia interna de cada celda. Los fabricantes Ukai y Kokam, no nos facilitan estos valores. En cambio, Enerland sí, que nos indica que a 1kHz la impedancia máxima es de 5mili-ohmios. Por ausencia de los datos mencionados, y, teniendo en cuenta que es un buen valor, es decir, una impedancia baja, finalmente seleccionaremos las celdas de Enerland PQ-5350LP. Además, podemos comprobar que es la que mayor energía específica posee, tanto total, como por unidad de masa, y que las tres poseen un peso total similar.



**Figura 5-1: Celda Enerland PQ-5350LP.**

La hoja de características proporcionada por el fabricante se adjunta en el anexo IV, al final del documento.

Como sabemos, Enerland es una empresa filial de A123 Systems. Esta nueva división de A123Systems se creó en el año 2000, y aún las líneas de productos de Enerland/PolyQuest y A123Racing (especializada en baterías para aeromodelismo y radiocontrol). Enerland dispone de dos plantas de fabricación, una en Corea y otra en China.

Todo lo anterior quiere decir que la empresa seleccionada cuenta con el respaldo de una de las empresas pioneras en el desarrollo de baterías de litio para vehículos eléctricos. Con esto, nuestra elección se ve reforzada, pues son muchos los fabricantes de vehículos que se han decantado por las baterías de la empresa madre, es decir, son ampliamente utilizadas en el sector. Como prueba de ello podemos poner algunos ejemplos de vehículos que utilizan estas baterías:

- Tesla Roadster: El pack de baterías desarrollado específicamente para las necesidades de este coche es conocido como sistema de almacenamiento de energía (del inglés: Energy Storage System (EES)), y se considera la piedra angular del diseño global del mismo, y donde radica su grandeza. Esto es así porque para conseguir la gran

aceleración que presenta el Roadster (de 0-97 km/h en 3,7 segundos) ha sido necesario crear un pack de baterías que presente el menor peso posible, y que asimismo sea capaz de entregar una alta densidad de energía en un espacio pequeño, y una elevada potencia. Por ello es por lo que se han escogido baterías de litio. En este caso concreto se han seleccionado con celdas cilíndricas de formato 18650, esto es, de dieciocho milímetros de diámetro y sesenta y cinco milímetros de largo. Cada ESS está compuesto por 6.831 celdas. Cada módulo asume un peso aproximado de 450 kilogramos, y almacena 53 kW-h de energía.



**Figura 5-2 : Celdas individuales 18650**

**Figura 5-3: Pack de baterías del Tesla Roadster**



**Figura 5-4: Detalle de la ubicación y el espacio ocupado por el pack de celdas en el Tesla Roadster**

- Killacycle: Es considerada la moto eléctrica más rápida del mundo [7], pues es capaz de acelerar de 0 a 96 km/h en menos de un segundo. En este caso, el fabricante de las baterías también es A123 Systems. En un principio comenzaron utilizando celdas cilíndricas del formato 18650, y recientemente optaron por utilizar módulos de celdas ensamblados en packs.



**Figura 5-5: Killacycle.**





**Figura 5-6: Detalle de las baterías A123 Systems utilizadas por KillaCycle.**

- Chrysler: Esta compañía ha elegido a A123Systems como su proveedor de módulos de baterías ya ensamblados, compuestos por celdas prismáticas, que se instalarán en el Dodge Circuit EV.



**Figura 5-7: Dodge Circuit EV.**



**Figura 5-8: Pack de baterías de A123 para Chrysler.**

- La Corporación Industrial del Automóvil de Shangai (SAIC), es el principal fabricante de automóviles en China, y, junto a A123 Systems ha creado una joint-venture [8], llamada Shanghai Advanced Traction Battery Systems Co. Dicha empresa tiene como objetivo abastecer de baterías de litio a los vehículos híbridos y eléctricos en China.
- Fisker Automotive es una empresa estadounidense que se ha creado recientemente para fabricar vehículos híbridos y eléctricos de lujo con un diseño deportivo y elegante. El proveedor de baterías elegido es A123 Systems. La empresa tiene previsto lanzar su modelo Karma a finales de 2.010.





**Figura 5-9: Fisker Karma**

En resumen, podemos concluir que las baterías del fabricante A123 Systems están ganando adeptos con rapidez, pues es la empresa que encabeza la carrera por encontrar la batería que por fin haga posible la viabilidad del vehículo eléctrico. Según lo expuesto anteriormente, se escogerán las baterías de Enerland, en detrimento del resto de fabricantes, por lo que reforzamos nuestra elección por el hecho de ser una empresa filial de una de las empresas líder del sector.



## **6. DISEÑO DEL PACK DE BATERÍAS**

## 6. DISEÑO DEL PACK DE BATERÍAS.

Una vez que hemos seleccionado el modelo de celdas adecuado, deberemos preparar el diseño del pack completo.

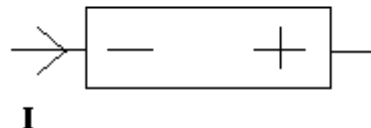
Según los cálculos que se reflejan en el capítulo 5, se concluye que, para el espacio del que disponemos en la motocicleta para ubicar las baterías,  $18 \text{ dm}^3$ , el pack podrá estar formado por un máximo de 338 celdas. Estas celdas deberán ser distribuidas de manera que, combinándolas en serie y en paralelo, obtengamos los valores de tensión y corriente que el controlador demanda para su correcto funcionamiento. Como ya se ha comentado en secciones anteriores, los requerimientos del controlador son:

- Tensión de entrada: 240-420 V.
- Corriente máxima: 400 A.

También ha sido mencionado que la tensión entregada por las baterías deberá ser la máxima posible, para reducir las pérdidas derivadas de una corriente elevada. Se ha de tener en cuenta, que las ramas en paralelo han de estar equilibradas, es decir, que todas las ramas deberán estar formadas por el mismo número de celdas.

## 6.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE CONEXIONADO

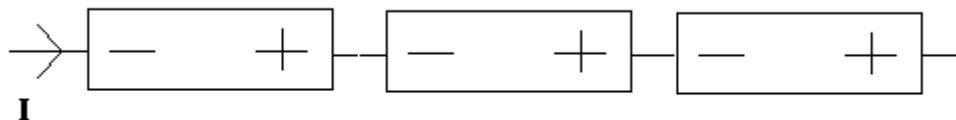
Se recuerda que en una conexión en serie, las tensiones entre bornes se suman, mientras que la corriente que atraviesa las celdas se mantiene igual a la de una única celda. Por el contrario, en una conexión en paralelo, la tensión entre bornes será la de la celda individual, el valor entre sus bornes, y la corriente será la multiplicación de la corriente de un elemento, por el número de ramas conectadas en paralelo. Para aclarar estos conceptos se representan estos sencillos ejemplos:



**Figura 6-1: Esquema representativo de una celda.**

Este esquema representa una celda, con sus bornes negativo y positivo. Esta celda es recorrida por una intensidad  $I$ , y entre sus bornes se obtiene una tensión  $V$ .

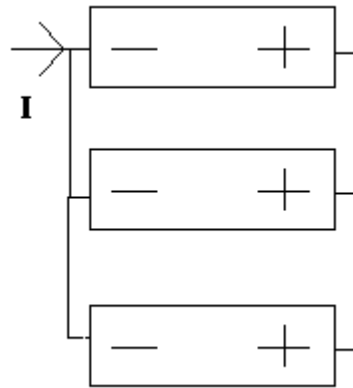
En el ejemplo en serie, se ha representado una rama serie, compuesta por tres celdas, donde la corriente que recorre la rama es  $I$ , y la tensión será la obtenida al multiplicar  $3 \cdot V$ :



**Figura 6-2: Esquema de tres celdas conectadas en serie.**

Esta configuración, es conocida como 3s1p, por estar conectadas 3 celdas en serie y una rama en paralelo.

En la conexión en paralelo, la corriente en el ejemplo siguiente será  $3 \cdot I$ , y la tensión total entre bornes es  $V$ :



**Figura 6-3: Esquema de tres celdas conectadas en paralelo.**

Esta configuración, según la nomenclatura, sería la denominada 1s3p.

## 6.2. SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN.

La selección de la configuración más adecuada a nuestro propósito, deberá cumplir las siguientes pautas:

- Conseguir los valores mencionados, para el correcto funcionamiento del controlador.
- Como máximo podrán colocarse 338 celdas.
- Se buscará la mayor tensión posible dentro del rango mencionado.
- Cada rama conectada en serie deberá tener el mismo número de elementos.

Teniendo presentes estas pautas, tenemos varias formas de conexionar las celdas. Los resultados posibles son los mostrados en la siguiente tabla:

| CONFIGURACIÓN | TENSIÓN (V) | INTENSIDAD (A) | POTENCIA (KW) |
|---------------|-------------|----------------|---------------|
| 112s3p        | 414,4       | 256,8          | 106,41792     |
| 84s4p         | 310,8       | 342,4          | 106,41792     |
| 67s5p         | 247,9       | 428            | 106,1012      |

**Tabla 6-1: Valores obtenidos con las diferentes configuraciones de las celdas.**

Donde:

- El valor de la tensión, se ha obtenido multiplicando el voltaje nominal de cada celda, por el número de elementos en serie.
- El valor de la intensidad se ha obtenido multiplicando la intensidad máxima que puede recorrer la celda, por el número de ramas en paralelo. Asimismo, el valor de la intensidad máxima, según los datos del fabricante, se obtiene cuando la descarga se realiza a un máximo de 16C, y alcanza un valor de:

$$I_{\text{máx}} = 85,6 \text{ A}$$

- La potencia se obtiene multiplicando los dos parámetros anteriores.

De esta tabla, podemos eliminar directamente la configuración 67s5p, por sobrepasar el valor de la intensidad máxima. Una vez eliminada esta, seleccionaremos la configuración 112s3p de entre las dos restantes, pues es la que presenta el mayor valor de tensión.

Como debemos conectar las celdas de tres en tres para conectar las ramas en paralelo de manera segura, para simplificar el cableado, éstas deberán ir juntas. Esto es importante a la hora de crear los bloques que darán la forma final al pack. Puesto que los bornes de conexión están ubicados en la parte superior y en la parte inferior de las celdas, con el mismo fin de facilitar el cableado, se ha decidido colocar las baterías con su lado más largo y estrecho en el plano horizontal. El diseño, junto con los esquemas explicativos de las conexiones a realizar, se explica con mayor detenimiento en la sección 6.4.

También es importante conocer que las baterías deberán ser confinadas en un espacio delimitado, puesto que las cargas y las descargas continuadas, las hacen contraerse y expandirse continuamente, lo que puede provocar una deslaminación de sus compuestos internos si las celdas no se encuentran comprimidas. Esta deslaminación, lo que conlleva finalmente es a la reducción del ciclo de vida de las baterías. En prevención de lo anterior, se aconseja, contener las celdas con algún montaje, por ejemplo, con un sencillo juego de placas, situadas una a cada extremo del bloque, y unas varillas roscadas que mantengan la distancia adecuada, y fija.

Una vez que ya tenemos clara la configuración del pack, pasamos a crearlo con un programa de diseño por ordenador. En este caso se realizará el diseño mediante el programa Pro-Engineer.

### **6.3. BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS).**

Este sistema, es comúnmente conocido como BMS (de las siglas en inglés *Battery Management System*), y puede ser traducido como Sistema de Gestión de la Batería. Según las recomendaciones de los fabricantes, sabemos que se hace necesario (y prácticamente imprescindible) instalar un sistema que sea capaz de controlar en todo momento al pack de baterías, con el fin de evitar calentamientos en las celdas perjudiciales para su funcionamiento, e incluso problemas de seguridad. Esto es así porque durante el funcionamiento de las baterías, las diferencias en el voltaje y en las temperaturas en las celdas pueden provocar desequilibrios eléctricos entre ellas, y reducir la eficiencia del pack hasta un 25% [9]. Estos problemas de ecualización pueden ser solventados implantando un BMS.

La función primordial del BMS es la de controlar y proteger las células de la batería, y lo hace de la siguiente manera:

- Control del estado de cada célula.
- Cálculo de datos secundarios.
- Presentación de informes con los datos.
- Control del entorno.
- Equilibrado.

Un BMS puede supervisar el estado de la batería por medio de diferentes vías, tales como la medida de:

- Tensión: Tensión total del pack y tensión individual de las celdas.
- Corriente que circula por la batería.
- Temperatura: temperatura global, o de las células individuales.
- Condiciones ambientales, como por ejemplo, un flujo de aire que enfríe las celdas.

Además, un BMS puede calcular más datos de utilidad, basándose en los anteriores, como por ejemplo:

- Estado de carga (SOC) o la profundidad de descarga (DOD): para indicar el nivel de la carga de la batería.



- Estado de salud (SOH), una media de diversos factores que definen el estado de salud general de la batería.
- La carga máxima actual, como un límite de la corriente de carga (CCL).
- Corriente máxima de descarga como un límite de descarga de corriente (DCL).
- Resistencia: tanto global como individual.
- Energía total entregada.
- Tiempo total de funcionamiento.

El sistema puede informar de todos los datos anteriores a un dispositivo externo, utilizando los enlaces de comunicación, tales como:

- Bus (típico de los ambientes de automoción).
- Cableado directo.
- Comunicaciones serie.
- Comunicaciones inalámbricas.

El BMS protege a la batería, impidiéndole que opere fuera de su área de operación segura, y evitando acciones tales como:

- Sobre-corrientes.
- Sobre-tensiones (durante la carga).
- Bajo voltaje (durante la descarga).
- El exceso de temperatura o una bajada excesiva de la temperatura.
- Presiones elevadas (típico de las baterías de Ni-MH).

Los mecanismos de los que el BMS dispone para impedir dicho funcionamiento fuera de la zona de operación segura de la batería son:

- Solicitar a los dispositivos a los que la batería está conectada a reducir su uso, o incluso darlo por terminado.
- Incluye un interruptor interno (por ejemplo, un relé o un dispositivo similar), que se dispara si la batería es operada fuera de su área de seguridad.
- Controlar activamente el ambiente, a través de calefactores, ventiladores o aire acondicionado.

Con el fin de maximizar la capacidad de la batería, y para evitar sobrecargas localizadas o tensiones demasiado bajas, el BMS puede garantizar que todas las células que componen la batería se mantienen en el mismo estado de carga. Puede hacerlo mediante:

- Gastando energía de las células más cargadas a través de una carga artificial (reguladores).
- Pasando la energía de las células más cargadas a las menos cargadas (balanceadores).
- Reduciendo la corriente de carga a un nivel lo suficientemente bajo para que no dañe las células con carga completa, mientras que las células menos cargadas pueden seguir cargando.

Las topologías de BMS en su mayoría se clasifican en tres categorías:

- Gestión centralizada: un solo controlador está conectado a todas las celdas de la batería a través de una multitud de cables. Esta topología se conoce comúnmente como topología en estrella.
- Distribuido: un chip se instala en cada celda. Éstos se unen con un cable de comunicación único entre la batería y el controlador. Esta topología se denomina anillo.
- Modular: se dispone de varios controladores, cada uno manejando un cierto número de células, que se comunican entre sí.

Cada una de estas topologías, presenta unas ventajas y unos inconvenientes diferentes:

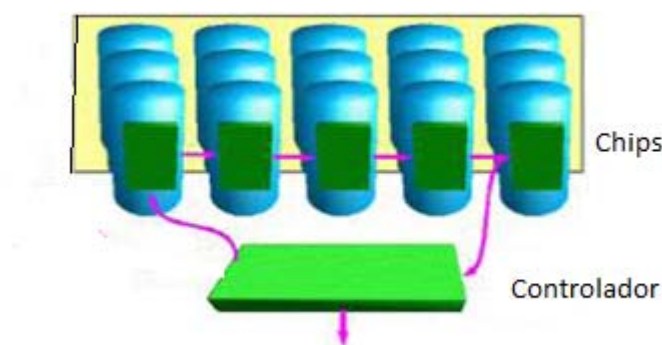
- La gestión centralizada es la más económica, pero la menos ampliable, y se ven afectadas por una multitud de cables.
- Los BMS distribuidos son los más caros, más simples de instalar, y ofrecen el ensamblaje más limpio.
- La topología modular ofrece un compromiso entre las características y los problemas de las otras dos topologías.

Como ya sabemos, es muy recomendable el uso de un sistema BMS en el pack de baterías, para evitar que se alcancen temperaturas elevadas que puedan dañar las celdas, o incluso resultar peligrosas.

Existen multitud de fabricantes, modelos y configuraciones para implementar un BMS. En el caso que nos ocupa, se ha optado por el BMS Lithiumate, de la marca Elithion [10], empresa ubicada en Colorado (EE.UU.) dedicada al desarrollo de soluciones electrónicas para la industria de las baterías de iones de litio. Esta empresa ha sido seleccionada por la gran cantidad de información y soluciones que ofrece en su web. Del mismo modo, podemos encontrar que esta empresa ha sido seleccionada por algunos fabricantes de vehículos eléctricos o de baterías a los que ya se ha hecho referencia en este documento. Algunos ejemplos de empresas que utilizan sistemas de Elithion son:

- Vectrix. Esta maxi-scooter utiliza un diseño de BMS de Elithion.
- Lightning Motorcycle. Una de las motocicletas eléctricas más rápidas del mundo.

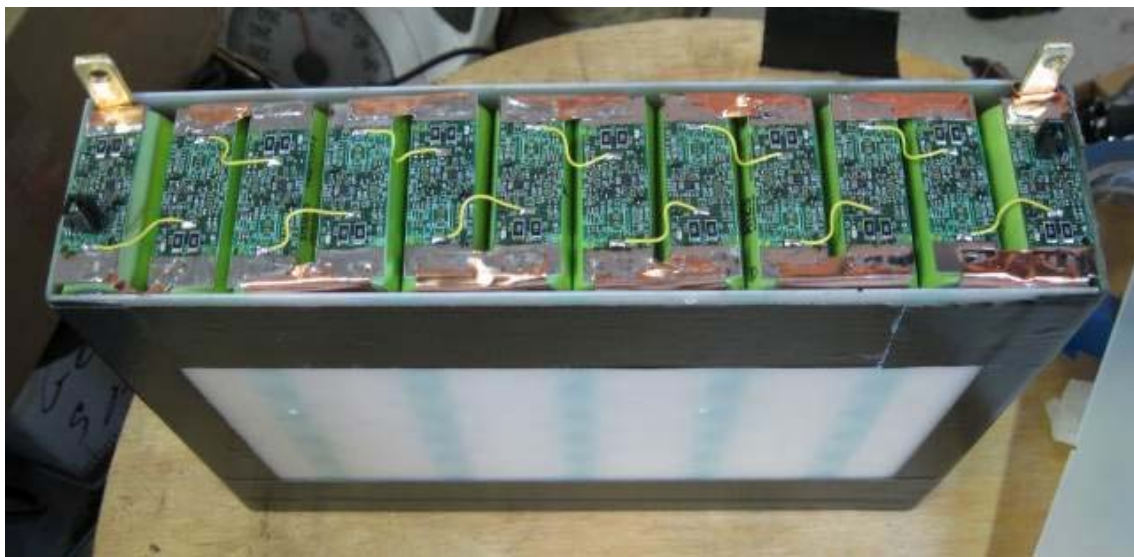
Según las especificaciones que se han encontrado, cada placa de circuito impreso, debe ir conectada a los bornes positivo y negativo de las celdas. Además, todas ellas deberán estar conectadas en serie, y al controlador de las mismas. A continuación se muestra una figura con el esquema de conexión a seguir:



**Figura 6-4: Conexión del BMS.**

Existen a disposición de los clientes varios tipos de placas de circuito impreso, que deberán ser seleccionados dependiendo del tipo de celda que tengamos, del tamaño de ésta, del número de las mismas y de la ubicación de éstas en el conjunto.

Por cada conjunto de celdas conectadas en paralelo, será necesario adicionar un chip o una placa de circuito impreso que controle el funcionamiento de las mismas. Así, en nuestro caso, deberemos colocar un chip por cada pack de tres celdas agrupadas en paralelo, lo que conduce a un total de 112 chips. Un ejemplo de cómo quedaría el pack con el BMS incluido, es el siguiente:



**Figura 6-5: Detalle de un pack de baterías con el BMS instalado.**

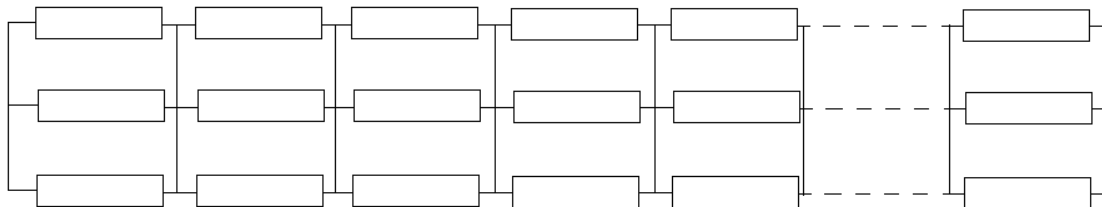
En resumen, se han de incluir en el diseño del pack las placas de circuito impreso que forman parte del BMS. Esto es así porque las placas ocupan un espacio con el que deberemos contar para calcular el volumen total que ocupará el pack final.

## 6.4. PRO-ENGINEER

Pro-Engineer es un programa de diseño 3D ofertado por la empresa Parametric Technology Corporation (PTC). Ofrece soluciones de software CAD/CAM/CAE 3D paramétricas e integradas, que ayudan a un diseño rápido. Las aplicaciones que presenta dicho programa permiten desarrollar todo el proceso desde la etapa de concepción hasta la fabricación.

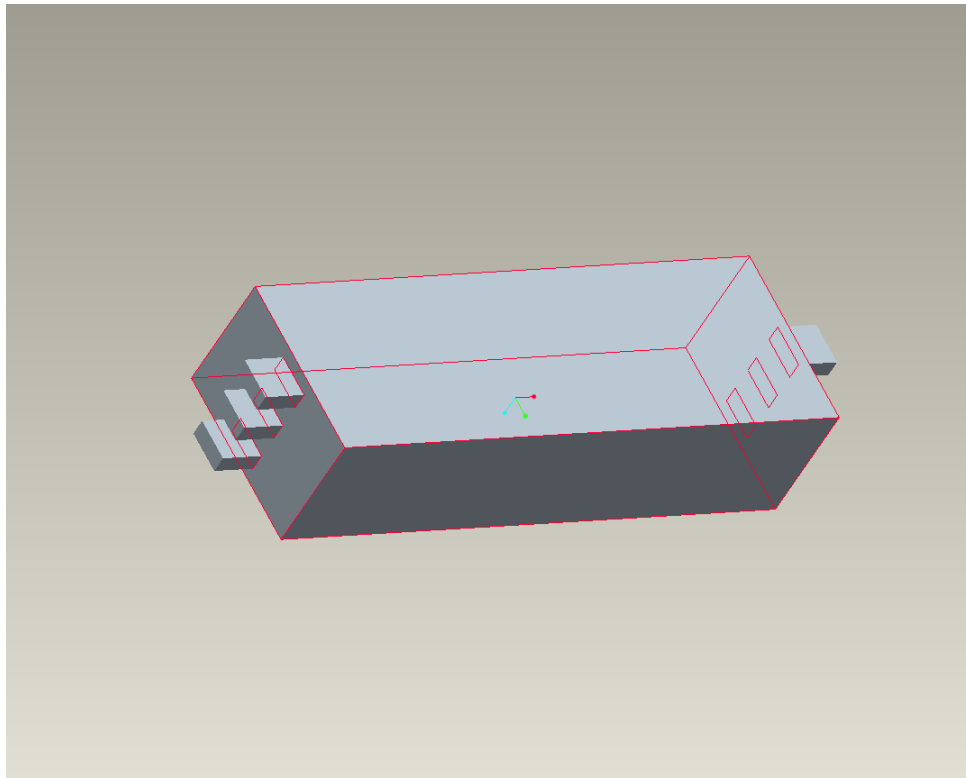
### 6.4.1. CREACIÓN DEL DISEÑO CON PRO-ENGINEER

Una vez especificada la configuración del pack de baterías, se procede a diseñarlo con la ayuda de Pro-Engineer. Como ya se ha explicado, la configuración elegida es 112s3p. Por tanto, para conseguirla, deberemos realizar el siguiente montaje:



**Figura 6-6: Esquema de conexión de n baterías en serie y tres ramas en paralelo.**

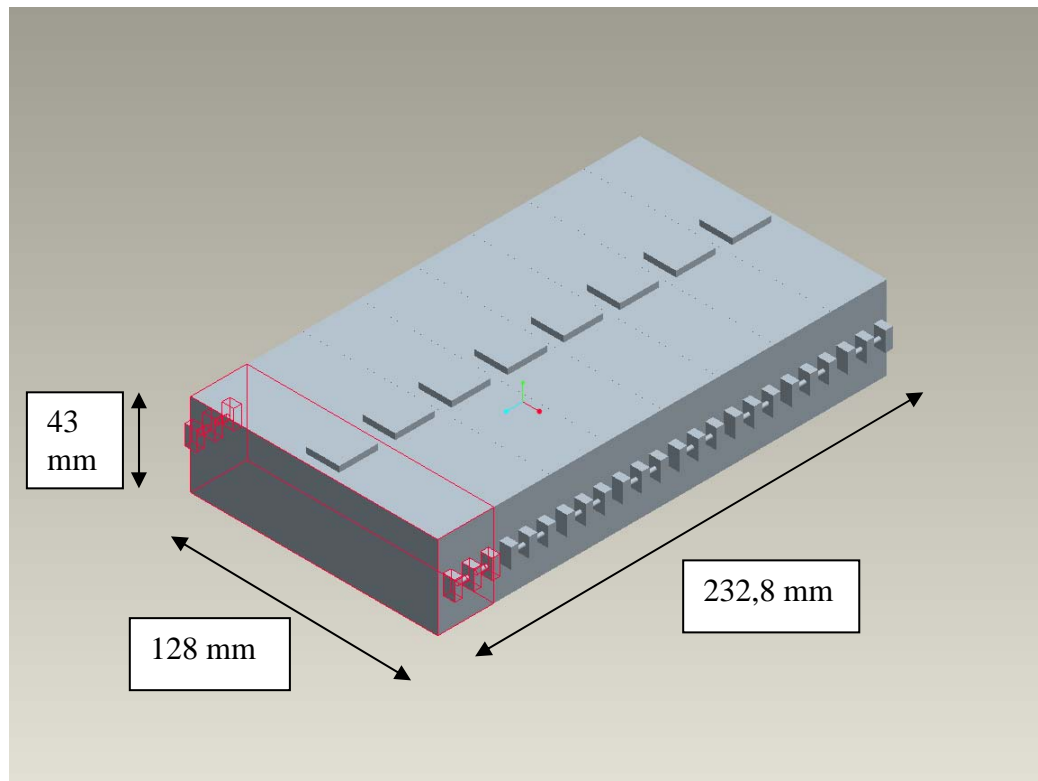
Se observa en la figura anterior las conexiones en paralelo de las celdas de tres en tres. Con Pro-Engineer el diseño del conjunto de tres celdas, es el siguiente:



**Figura 6-7: Conjunto formado por tres celdas.**

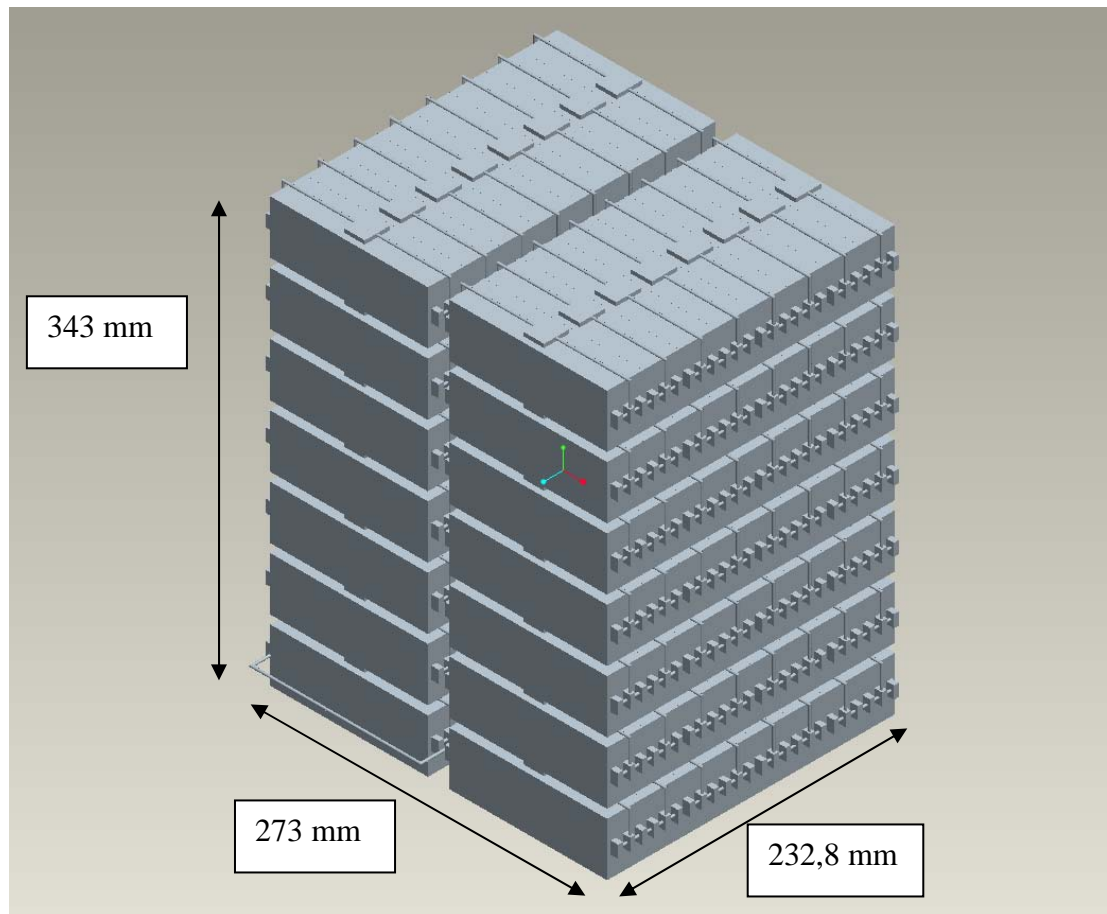
En esta figura faltaría conectar los bornes adyacentes entre sí para realizar la conexión en paralelo de las mismas.

Además, teniendo en cuenta las dimensiones reducidas del espacio destinado al pack de baterías, habrá que agruparlas de manera que sea un bloque lo más compacto posible. Se han realizado diferentes pruebas, y, finalmente se ha optado por un conjunto formado por bloques de 24 celdas, dispuestas una a continuación de la otra. Esta elección nos es adecuada por facilitar el cableado, a la hora de realizar las conexiones en paralelo, de tres en tres, ya que 24 es múltiplo de 3, y nos da una longitud total de unas dimensiones apropiadas a nuestro objetivo. El bloque formado por las 24 celdas se muestra a continuación:



**Figura 6-8: Bloque de 24 celdas.**

Para distribuir el total de celdas necesitamos un total de 14 bloques de 24 celdas. Estos bloques pueden colocarse de la manera deseada, pero, para conseguir una configuración lo más compacta posible, dadas las dimensiones de cada celda, hemos optado por distribuir los 14 bloques con 7 filas y dos columnas. El resultado es el que sigue:

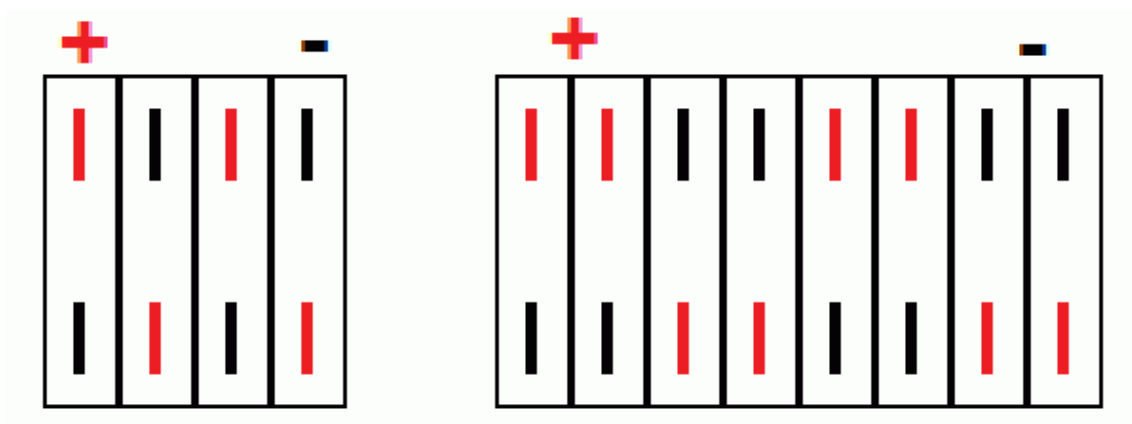


**Figura 6-9: Pack de baterías completo.**

Se ha dejado espacio entre los bloques, para facilitar la evacuación del calor. No obstante, este espacio puede ser modificado si fuera necesario reducir aún más el volumen ocupado.

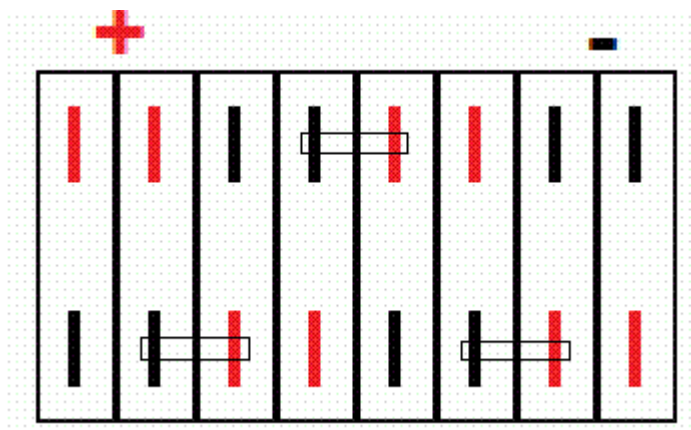
Finalmente, se ha procedido a realizar las conexiones que restan, para ello se han de unir en serie todos los grupos de tres. Esta conexión se simplifica colocando cada conjunto de celdas en paralelo con la misma polaridad, y alternando estos bloques de manera que un polo positivo se encuentre adyacente a uno negativo, de la siguiente forma:





**Figura 6-10: Colocación de las celdas. En el caso de la izquierda la configuración es 4s1p. En el caso de la derecha la configuración es 4s2p.**

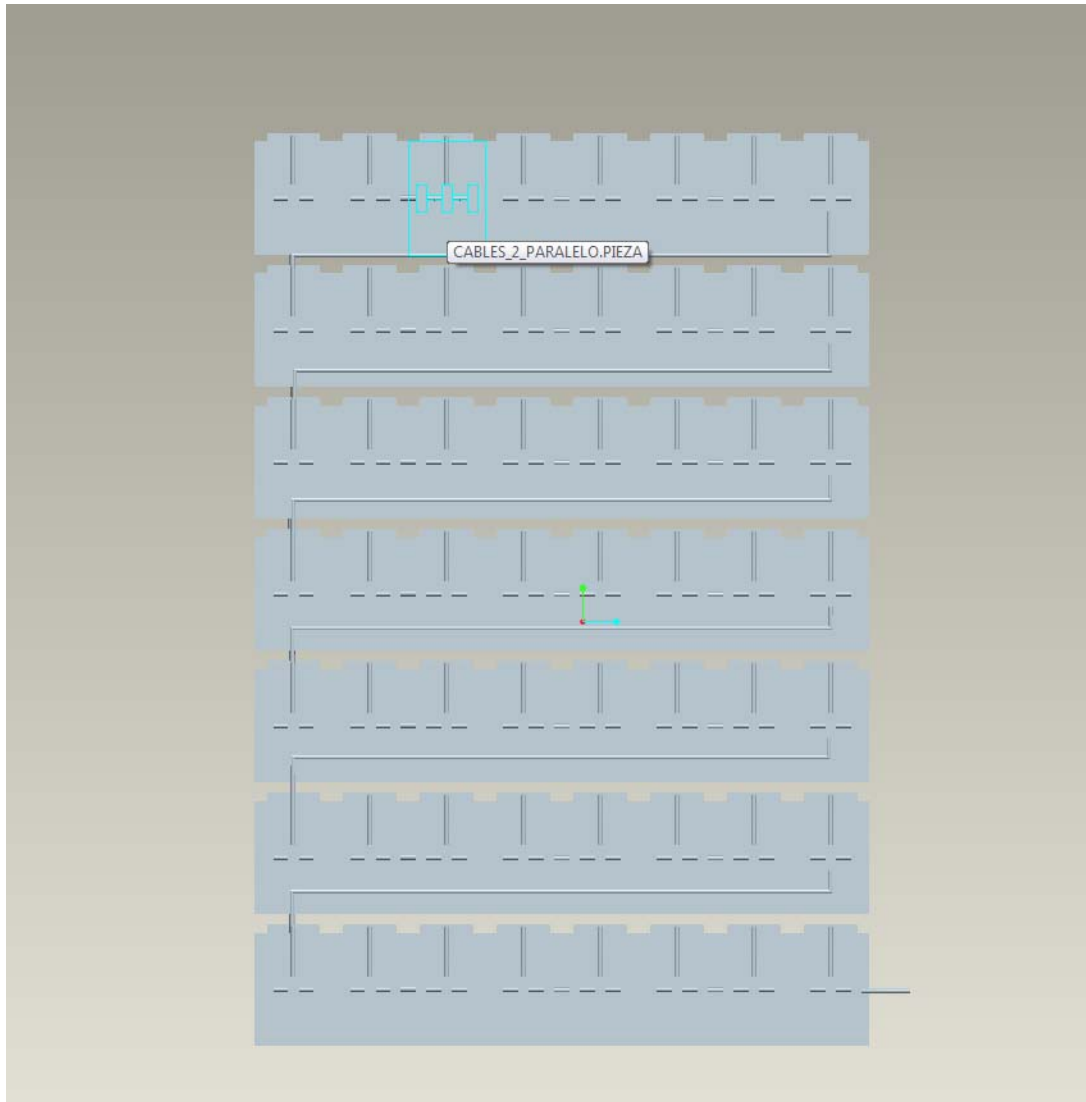
A continuación se muestra un esquema de cómo han de ir conectados estos conjuntos:



**Figura 6-11: Conexión de los conjuntos en paralelo.**

De esta manera, se van uniendo un polo negativo con su adyacente positivo; el negativo de esta con el adyacente positivo y así sucesivamente hasta completar el cableado serie. Podemos observar los detalles de la conexión serie en la figura siguiente. En ella se ve una vista lateral del conjunto. Se observa cómo se va realizando la conexión de la manera mencionada en líneas anteriores, y cómo el final de cada

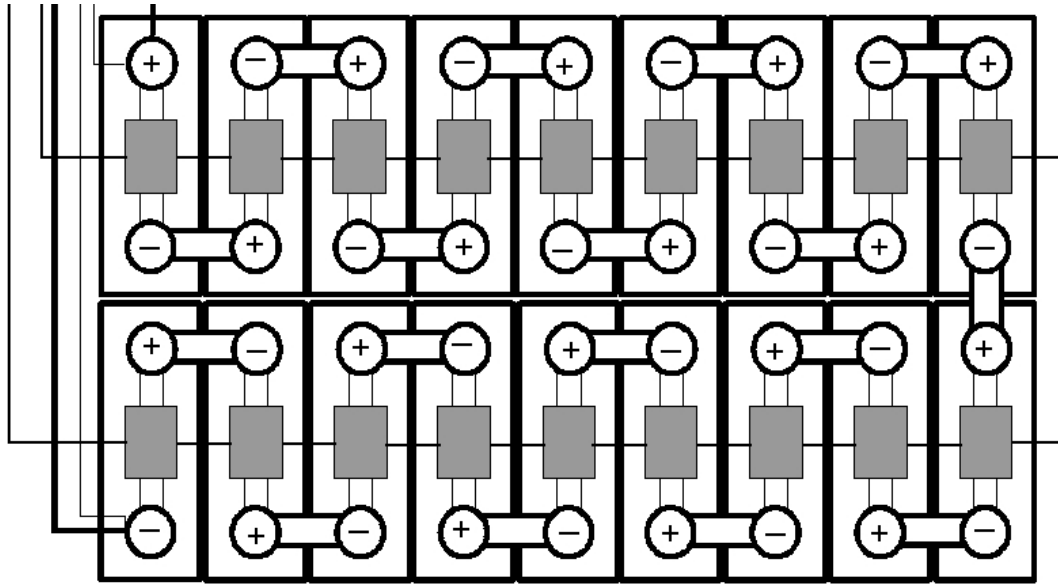
bloque (en la parte derecha de la figura), va unido al siguiente (en la parte izquierda de la figura).



**Figura 6-12: Vista lateral del conjunto.**

Se puede observar, además, como las placas de circuito impreso que forman parte del BMS se han colocado en la parte superior, una placa por cada tres celdas agrupadas en paralelo, conectadas al borne positivo y al negativo, y entre ellas en anillo. En la figura 6.11 se observa la conexión del BMS<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Esquema del modelo TS90 de la empresa EV Power Australia Pty Ltd.



**Figura 6-13: Esquema de conexión de las placas de circuito impreso del BMS.**

En el apartado 6.3 se explica con más detalle qué es un BMS y cómo actúa.

Las dimensiones finales del pack completo, serán las de un prisma rectangular de:

- Alto: 343 mm.
- Ancho: 273 mm.
- Fondo: 232,8 mm.



## 7. GENERACIÓN DE CALOR

## 7. GENERACIÓN DE CALOR.

Como ya hemos hablado a lo largo de este documento, las baterías de litio son las que mejor encajan con las cualidades que deseamos para las baterías de los vehículos eléctricos. Sin embargo, uno de los problemas principales de las baterías de litio es su alto poder de inflamación, que incluso puede llegar a producir explosiones, cuando son sometidas a altas temperaturas. Por tanto, tendremos que salvar este inconveniente para poder utilizarlas sin riesgo alguno. En las siguientes páginas vamos a hacer un estudio sobre las necesidades de gestión térmica que necesitan estas baterías para poder operar con seguridad.

En primer lugar se realizará un análisis unidimensional orientativo, para obtener la temperatura máxima alcanzada por el pack de baterías.

En segundo lugar se va a desarrollar un modelo de simulación que represente el funcionamiento del pack de baterías, con ayuda del software adecuado. Este modelo será ejecutado simulando las solicitaciones de potencia máximas, lo que equivaldrá a las mayores pérdidas de potencia en forma de calor (por el Efecto Joule). Estas pérdidas de calor harán aumentar la temperatura de las celdas, y podremos ver en la simulación las temperaturas que se alcanzan en todo el pack.

Una vez conocidas las máximas temperaturas, estaremos en disposición de decidir si es necesario añadir algún tipo de refrigeración adicional, y, en ese caso, elegir qué tipo es más adecuado, o de si sólo es necesaria la convección forzada. Asimismo, el modelo será probado en las condiciones climáticas más adversas, para asegurar la seguridad del pack en todo momento. La necesidad de controlar la temperatura del pack, también se justifica por los siguientes aspectos:

- Las temperaturas alcanzadas en cada celda podrán diferir unas de otras, lo que se traducirá en un comportamiento distinto en cuanto a la carga y/o descarga de las mismas. Estas diferencias provocarán que el pack no esté equilibrado.
- Es destacable el hecho de que la temperatura de la batería afecta a la manera en que se produce la descarga de energía, y esto es

especialmente importante en el arranque o cuando se necesita acelerar el vehículo.

- Como ya se sabe, las temperaturas a las que se exponen las baterías, también inciden de manera muy importante en el ciclo de vida de la misma, disminuyéndolo ostensiblemente si no se ponen los medios adecuados para evitarlo.

Es obligado decir que diseñar un modelo de transferencia de calor que se adecue a nuestro propósito supone una gran dificultad, por todo lo comentado anteriormente, y también debido a la gran variedad existente de composiciones y de la química empleada en cada batería. Asimismo, desconocemos los valores de algunos parámetros que el fabricante no nos proporciona. Por tanto, en nuestro análisis, se harán algunas simplificaciones y suposiciones, que en su momento serán debidamente justificadas.

### **3.1. PARÁMETROS A CONSIDERAR**

#### **7.1.1. COEFICIENTE DE CONDUCCIÓN**

Para conocer los valores del coeficiente de conducción de las baterías, sería necesario conseguir una celda del tipo elegido, y realizar los experimentos y mediciones pertinentes hasta obtener el dato. Debido a que las baterías escogidas no se habían recibido durante el desarrollo de este proyecto, se ha decidido buscar el dato por otros medios. Son numerosas las publicaciones científicas publicadas al respecto, por múltiples universidades y organizaciones. Se ha realizado un trabajo de búsqueda de las publicaciones que se ajustasen a estos estudios, y se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Las partes internas que forman una celda de la batería son, principalmente: el cátodo, el ánodo y las correspondientes láminas separadoras. Al comparar los coeficientes de conductividad de dichas partes, nos damos cuenta de que son muy similares, y, por ser del mismo orden de magnitud, podemos concluir que se comportarán de manera similar en la transferencia de calor. Esto nos lleva a la conclusión de que podemos utilizar un coeficiente equivalente que englobe a los componentes internos y de esta manera, trabajar con él de manera más simplificada.
- Tras revisar numerosas publicaciones al respecto, hemos encontrado los valores del coeficiente de conducción en este tipo de baterías. Según la referencia [11], la conductividad térmica, tanto en celdas prismáticas, como cilíndricas es fuertemente dependiente de la dirección del flujo de calor con respecto al electrodo de la pila. Para el caso de las pilas prismáticas, se han obtenido unos valores para la conductividad de:

$$k_{\text{perpendicular}} = 1,848 \text{ W/mK.}$$

$$k_{\text{paralela}} = 26,69 \text{ W/mK.}$$

### **7.1.2. COEFICIENTE DE CONVECCIÓN**

Dicho coeficiente será tomado a la temperatura del ambiente, es decir, del aire a una temperatura media de 25°C, en un espacio confinado. Como este coeficiente depende de varios factores, como son la humedad, la rugosidad del material adyacente, etc. Se han realizado estudios para los valores extremos entre los cuales suele oscilar este valor. Estos valores que tomaremos son  $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , según la referencia [12].

Sin embargo, si asumimos el caso extremo, es decir, cuando las baterías están entregando al controlador 40 kW, el coeficiente de convección aumentará considerablemente, pues la moto estará en movimiento, a una velocidad elevada, por lo que la convección se verá favorecida. Entonces podremos suponer un efecto de convección forzada que reducirá la temperatura en las celdas. Por tanto, debido a que el coeficiente variará según el funcionamiento, se harán las pruebas con ambos valores.

### **7.1.3. UMBRALES DE TEMPERATURA ACEPTABLES**

Según los fabricantes de baterías, las celdas trabajan adecuadamente en unos umbrales de temperatura determinados. Fuera de estos umbrales de temperatura, se hace necesario adicionar un sistema de control de la temperatura.

Normalmente el rango de temperaturas adecuado para efectuar la carga oscila entre los 0°C y los 60°C de temperatura ambiente. La temperatura máxima recomendada de funcionamiento es de 70 °C, y la temperatura máxima permitida en las celdas es de 85°C.

### **7.1.4. GEOMETRÍA DEL PACK**

El número de celdas totales que componen el pack puede distribuirse en múltiples formas y tamaños. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que en el vehículo para el que va dirigido nuestro estudio, una motocicleta, el espacio es reducido, y deberán tenerse en cuenta, además, otros aspectos importantes, tales como el centro



de gravedad. También es importante la geometría, pues en determinadas configuraciones, el pack será capaz de disipar más calor hacia el exterior. Como sabemos, las temperaturas más elevadas se producirán en el centro del pack, por lo que estas celdas serán las que necesiten mayor refrigeración.

### **7.1.5. CALOR GENERADO**

Como ya sabemos, el calor generado en el pack se calcula siguiendo la Ley de Ohm, de la siguiente manera:

$$Q_{\text{gen}} = R_{\text{interna}} * I^2$$

El dato de la resistencia interna que nos proporciona el fabricante es de  $5\text{m}\Omega$ .

### **7.1.6. SIMPLIFICACIONES**

Para simplificar el análisis térmico, se ha optado por desestimar las pérdidas por el efecto Joule en el cableado. Esto es así debido a que los cables presentan una sección y una longitud muy pequeña, comparados con el volumen ocupado por las celdas propiamente dichas. Se ha considerado que las placas de circuito impreso que conforman el BMS se comportan en la conducción de igual manera que las celdas. Del mismo modo, ocupan una parte muy inferior, comparándola con el volumen total de las celdas, por lo que su efecto no será determinante para obtener los resultados.

## 7.1. CONDUCCIÓN CON GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA EN UNA PARED PLANA

De acuerdo a lo explicado en el libro *Fundamentos de transferencia de calor* [12], considerando una pared plana, en la que hay generación de energía uniforme por unidad de volumen ( $q'$  es constante), donde las superficies se mantienen a una temperatura  $T_s$ , para una conductividad térmica constante  $k$ , la ecuación de calor apropiada es la siguiente:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q'}{k} = 0$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{-q'}{k} \cdot x + C1$$

$$T(x) = \frac{-q' \cdot x^2}{2 \cdot k} + C1 \cdot x + C2$$

Por ser una distribución simétrica, se cumple que:

$$\frac{dT}{dx}(x = 0) = 0$$

Entonces, operando, obtenemos que:

$C1=0$ , y la ecuación del calor resultante es la que sigue:

$$T(x) = \frac{-q' \cdot x^2}{2 \cdot k} + C2$$

$$C2 = \frac{q'}{2 \cdot k} \cdot L^2 + T_s$$

$$T(x) = \frac{q' L^2}{2k} \left(1 - \frac{x^2}{L^2}\right) + T_s$$

Como sabemos, la temperatura máxima se obtiene en el plano medio:

$$T_{m\acute{a}x} T(0) = \frac{q' L^2}{2k} + T_s$$

Aplicando un balance de energí, podremos obtener la temperatura en la superficie:

$$-k \frac{dT}{dx}(x=L) = h(T_s - T_{inf})$$
$$T_s = T_{inf} + \frac{q' L}{h}$$

Por tanto, recapitulando, según los cálculos seguidos para la conducción con generación de energía térmica en una pared plana, las fórmulas que utilizaremos son las siguientes:

$$T_s = T_{inf} + \frac{q' L}{h}$$
$$T_{m\acute{a}x} = \frac{q' L^2}{2k} + T_s$$

Donde:

- El volumen total del pack de baterías es de 20,44 litros.
- La potencia/metro cúbico se simboliza con q'.
- h es el coeficiente de convección, que para compararlo con las simulaciones de elementos finitos, se ha tomado  $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- L se corresponde con la longitud de la mitad del bloque.
- k es el coeficiente de conducción, en este caso en paralelo,  $k= 26,69 \text{ W/mK}$ .
- $T_{inf}$  es la temperatura en los alrededores, y se ha tomado como  $40^\circ\text{C}$ .

A continuación, se va a proceder a calcular la temperatura máxima alcanzada en el pack de baterías, bajo diferentes hipótesis de funcionamiento. Los casos de 1C y 2C se corresponden con los valores a los que el fabricante recomienda efectuar la carga, como máximo.

Además, se va a proceder a calcular la temperatura máxima en la descarga, cuando el controlador está exigiendo una alta demanda de potencia. El controlador es

capaz de trabajar a un máximo de 45 KW. Por tanto, para poner un ejemplo en el que las solicitudes sean altas, pero no máximas, supondremos que el controlador trabaja a 40 KW. En este caso, el equivalente de capacidad se calcula de la siguiente manera:

$$40 \text{ kW} / 414,4 \text{ V} = 96,5251 \text{ Amperios}$$

$$96,5251 \text{ Amperios} / 3 \text{ ramas} = 32,175 \text{ Amperios}$$

$$32,175 \text{ Amperios} / 5,35 \text{ Amperios} \cdot \text{hora} = 6,014 \text{ h}^{-1} \approx 6 \text{ C}$$

Por tanto, se calcularán las temperaturas para 6C, para simular el comportamiento de la descarga.

▪ CASO 1C:

El calor generado en el interior de las baterías mediante el efecto Joule se calcula de la siguiente forma:

$$1 \text{ h}^{-1} \cdot 5,35 \text{ Ah} = 5,35 \text{ Amperios}$$

C tiene unidades de  $\text{h}^{-1}$ , por ello, al multiplicarlo por la corriente de cada celda obtenemos los Amperios que circularán por una celda. Si esta cantidad se multiplica por las tres celdas que existen en el paralelo, obtenemos la corriente total que circula por el pack:

$$I = 5,35 \text{ A} \cdot 3 = 16,05 \text{ Amperios}$$

A continuación calculamos el calor generado por uno de los conjuntos de celdas en paralelo, siendo la resistencia interna el paralelo de las tres:

$$Q_{gen} = R_{equiv\_3\_paralelo} \cdot I^2 = \frac{5 \cdot 10^{-3} \Omega}{3} \cdot (16,05)^2 = 0,4293375 \text{ W}$$

El calor generado del pack entero se obtiene multiplicándolo por los 112 grupos del paralelo:

$$Q_{gen\_total} = 0,4293375 \text{ W} \cdot 112 = 48,0858 \text{ W} \approx 48 \text{ W}$$

Entonces, con este dato se puede calcular la generación de calor por unidad de volumen, y las temperaturas requeridas:

$$q'(1C) = \frac{48 \text{ W}}{20,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} = 2348,3 \text{ W} / \text{m}^3$$

$$T_s = 40^{\circ}\text{C} + \frac{2348,3\text{W} / \text{m}^3 \cdot 0,128\text{m}}{10\text{W} / \text{m}^2\text{K}} = 70,05824^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{máx}} = \frac{2348,3\text{W} / \text{m}^3 \cdot (0,128\text{m})^2}{2 \cdot 26,69\text{W} / \text{mK}} + 70,05824^{\circ}\text{C} = 70,779^{\circ}\text{C}$$

▪ CASO 2C:

En este caso, operando de la misma forma que en el caso anterior, el calor generado será:

$$2h^{-1} \cdot 5,35\text{Ah} = 10,7\text{Amperios}$$

$$I = 10,7\text{A} \cdot 3 = 32,1\text{Amperios}$$

$$Q_{\text{gen}} = R_{\text{equiv}_3\text{-paralelo}} \cdot I^2 = \frac{5 \cdot 10^{-3}\Omega}{3} \cdot (32,1)^2 = 1,71735\text{W}$$

$$Q_{\text{gen\_total}} = 1,71735\text{W} \cdot 112 = 192,3432\text{W}$$

A continuación, se calcula la temperatura máxima alcanzada en el pack:

$$q'(2C) = \frac{192,3432\text{W}}{20,44 \cdot 10E-03\text{m}^3} = 9410,13\text{W} / \text{m}^3$$

$$T_s = 40^{\circ}\text{C} + \frac{9410,13\text{W} / \text{m}^3 \cdot 0,128\text{m}}{10\text{W} / \text{m}^2\text{K}} = 160,449^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{máx}} = \frac{9410,13\text{W} / \text{m}^3 \cdot (0,128\text{m})^2}{2 \cdot 26,69\text{W} / \text{mK}} + 160,449^{\circ}\text{C} = 163,337^{\circ}\text{C}$$

▪ CASO 6C:

Operando igual que en los casos anteriores, se obtienen los datos siguientes, teniendo en cuenta que la cantidad de 6C se obtiene con el controlador trabajando a 40KW:

$$\frac{40\text{KW}}{414,4\text{V}} = 96,5251\text{Amperios}$$

$$Q_{\text{gen}} = R_{\text{equiv}_3\text{-paralelo}} \cdot I^2 = \frac{5 \cdot 10^{-3}\Omega}{3} \cdot 96,525^2 = 15,528\text{W}$$

$$Q_{gen\_total} = 15,528W \cdot 112 = 1740W$$

$$q'(6C) = \frac{1740W}{20,44 \cdot 10E - 03m^3} = 85127,2W / m^3$$

$$T_s = 40^\circ C + \frac{85127,2W / m^3 \cdot 0,128m}{10W / m^2 K} = 1129,628^\circ C$$

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{85127,2W / m^3 \cdot (0,128m)^2}{2 \cdot 26,69W / mK} + 1129,628^\circ C = 1155,756^\circ C$$

Los resultados obtenidos se resumen de la siguiente manera:

- En el primer caso, es decir, para la carga realizada a 1C, las temperaturas alcanzadas no llegan a 71°C. Estas temperaturas son aceptables para el buen funcionamiento del pack de baterías, y más si tenemos en cuenta que la conducción no va a ser unidimensional, sino que va a evacuarse calor por todas las caras del pack, por lo que la temperatura será inferior. Por tanto, en este caso, y, según lo visto, no sería necesaria la refrigeración.
- En el caso de la carga de las baterías a 2C, observamos que la temperatura máxima se eleva hasta los 163,337°C. Esta temperatura se sale de los límites aceptables de funcionamiento de las baterías. Si bien es cierto que en el caso real las baterías disiparán más calor que en caso unidimensional, no sabemos cuantificarlo a priori, y, por lo tanto, aquí sí sería necesario estudiar el caso con mayor detalle, para saber si definitivamente sería necesario un sistema de refrigeración o no.
- En el caso de la descarga a 6C, las temperaturas se elevan peligrosamente, a más de 1000°C. Este caso nos corrobora la necesidad de realizar un estudio más minucioso.

A la vista de estos resultados, podemos concluir que son unos valores demasiado elevados para nuestro propósito, y necesitamos mayor precisión para poder tomar la decisión de la implantación del sistema de refrigeración con seguridad.

Es por ello por lo que se procede a realizar un estudio más minucioso y fiable con el programa Femap.

## **7.2. FEMAP**

El programa FEMAP (Finite Element Modeling And Postprocessing) es un software de la empresa Siemens utilizado para construir y solucionar modelos de elementos finitos en ingeniería.

Los métodos de elementos finitos son métodos numéricos que tratan de solucionar un problema complejo y continuo, mediante aproximaciones e iteraciones de ecuaciones diferenciales. Consiste en dividir el conjunto en un número finito de elementos, cuyo comportamiento es especificado según algunos parámetros. La solución del problema en conjunto se obtendrá como la solución de las partes elementales discretizadas, teniendo en cuenta las restricciones existentes entre ellas.

FEMAP funciona en el entorno Windows y es posible importar modelos desde otros programas de CAD. Incorpora herramientas de modelado y mallado para crear modelos de elementos finitos. Incorpora un módulo térmico (TMG Thermal Solver) y otro para resolver problemas de mecánica de fluidos (Flow Solver). A continuación, gracias al módulo de post-procesado, podemos solucionar el problema e interpretar el análisis realizado gracias a los informes disponibles.

En nuestro caso se ha utilizado la última versión, esto es, la versión 10.1.

### **7.2.1. CONCEPTOS SOBRE LA CARGA Y DESCARGA.**

Es conocido que el ciclo de vida de las baterías se ve reducido notablemente si aumentamos el valor de C de la carga o la descarga. Según el fabricante de las baterías en cuestión, con una tasa de 1C, tanto para la carga, como para la descarga, el ciclo de vida se mantiene en un 70% de su capacidad de retención durante 500 ciclos. En cambio, el número de ciclos para los que mantiene ese mismo porcentaje de retención, el 70 %, disminuye considerablemente, hasta sólo 50 ciclos, si la carga se efectúa a 1C, pero la descarga se hace a 16C.

## 7.2.2. EVALUACIÓN DE LAS TEMPERATURAS CON FEMAP

El diseño del pack ha sido importado desde el programa de diseño Pro-Engineer. Los casos que se van a analizar son:

Calor producido durante la carga de la batería:

- Carga de las celdas a 1C.
- Carga de las celdas a 2C (máximo recomendado por el fabricante).

Calor producido durante la descarga de la batería:

- Descarga máxima (limitada por el controlador) a una temperatura ambiente de 25°C.
- Descarga máxima (limitada por el controlador) a una temperatura ambiente de 40°C.

Para los estudios de la carga, el coeficiente de convección será el más desfavorable, es decir,  $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Las pruebas para los estudios de descarga máxima serán realizadas con los dos valores del coeficiente de convección comentados con anterioridad, es decir, para  $h=10$  y  $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Estos estudios nos harán saber las temperaturas alcanzadas a una temperatura ambiente exterior de 25°C, y a una temperatura más extrema, 40°C.

### 7.2.2.1. Calor producido durante la carga.

En la hoja de características que nos proporciona Enerland, se recomienda no efectuar la carga de la batería a un valor mayor de 2C. Para realizar el estudio de temperaturas alcanzadas, se ha ensayado con dos valores: 1C y 2C.

#### ❖ Carga realizada a 1C, $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}=40^\circ\text{C}$ .

El calor generado en el interior de las baterías mediante el efecto Joule se calcula de la siguiente forma:

$$1 \text{ h}^{-1} * 5,35 \text{ Ah} = 5,35 \text{ Amperios}$$

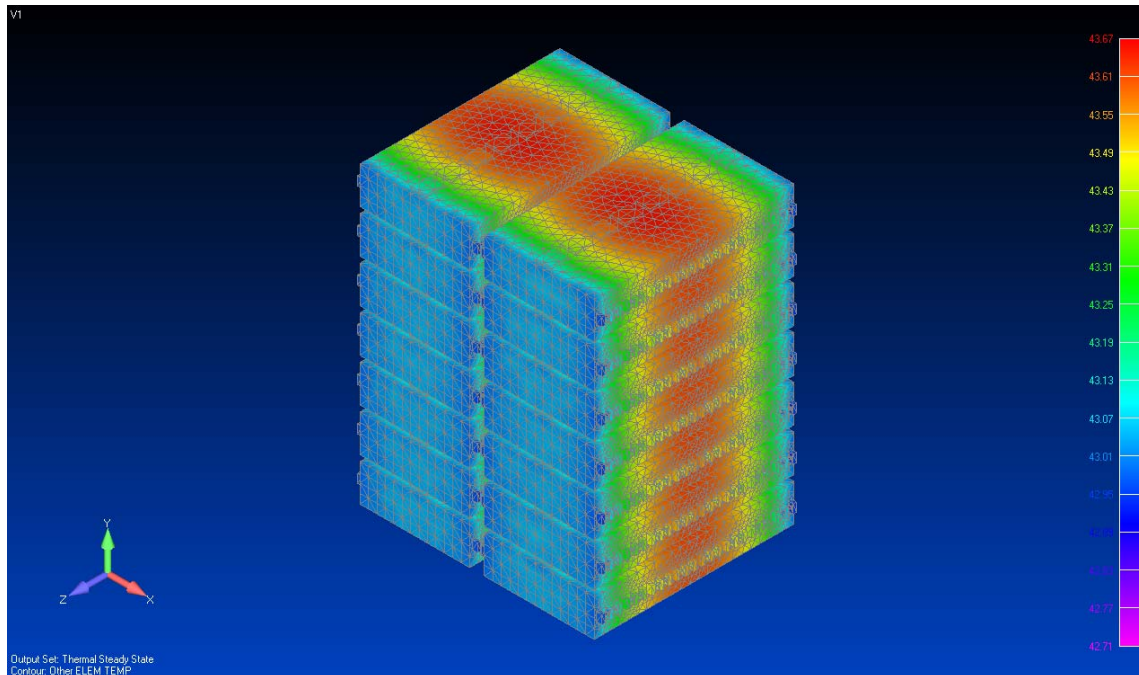
$$I = 5,35 \text{ A} * 3 = 16,05 \text{ Amperios}$$

$$Q_{\text{gen}} = R_{\text{equiv\_3\_paralelo}} * I^2 = (5 * 10^{-3}) \Omega / 3 * (16,05)^2 = 0,4293375 \text{ W}$$

$$Q_{\text{gen\_total}} = 0,4293375 \text{ W} * 112 = 48,0858 \text{ W}$$



Una vez realizada la simulación, el resultado es el siguiente:



**Figura 7-1: Calor generado durante la carga a 1C,  $h=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ .**

Como se puede observar en la figura, el calor se localiza en el centro de las baterías, y es menor hacia los extremos.

Las temperaturas obtenidas tras el análisis con Femap son:

$$T_{\text{máx}} = 43,676 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$T_{\text{mín}} = 42,637 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Esto se puede ver mejor con un diagrama de líneas isoterma:

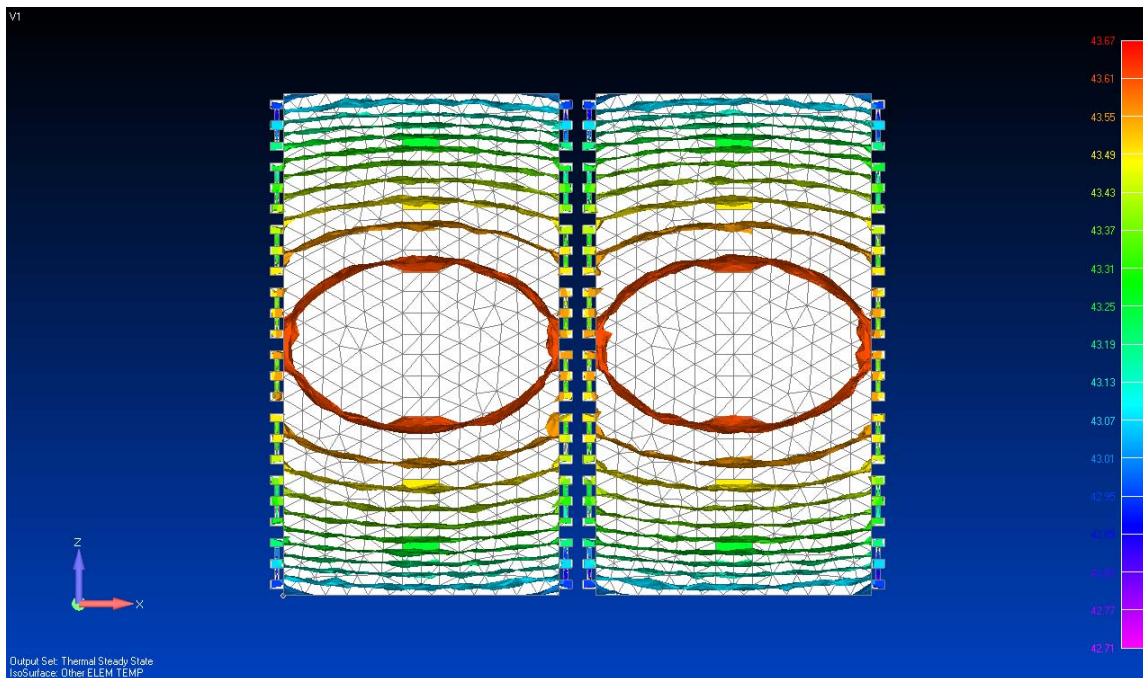


Figura 7-2: Diagrama de líneas isotermas para el caso de carga a 1C.

❖ Carga realizada a 2C,  $h=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ .

En este caso, como cambia la tasa de carga, también cambia la Intensidad, y, por ende, la potencia y el calor generado.

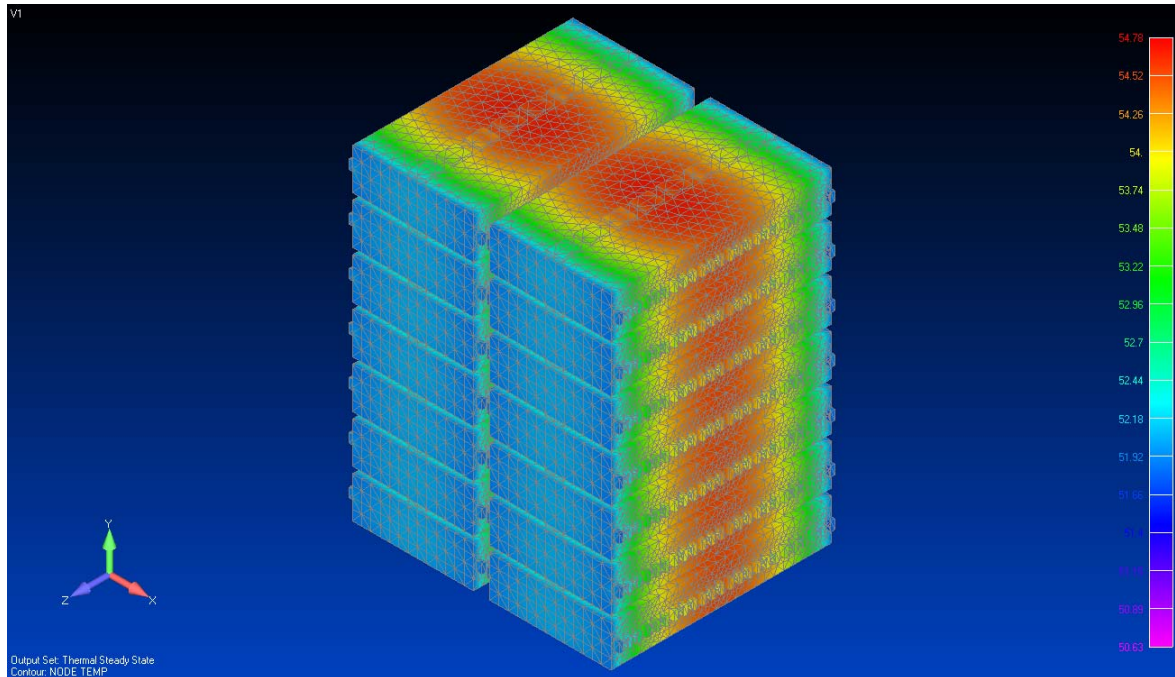
$$2 \text{ h}^{-1} * 5,35 \text{ Ah} = 10,7 \text{ Amperios}$$

$$I = 10,7 \text{ A} * 3 = 32,1 \text{ Amperios}$$

$$Q_{\text{gen}} = R_{\text{equiv}_3_{\text{paralelo}}} * I^2 = (5 * 10^{-3}) \Omega / 3 * (32,1)^2 = 1,71735 \text{ W}$$

$$Q_{\text{gen\_total}} = 1,71735 \text{ W} * 112 = 192,3432 \text{ W}$$

El resultado obtenido se muestra en la figura siguiente:



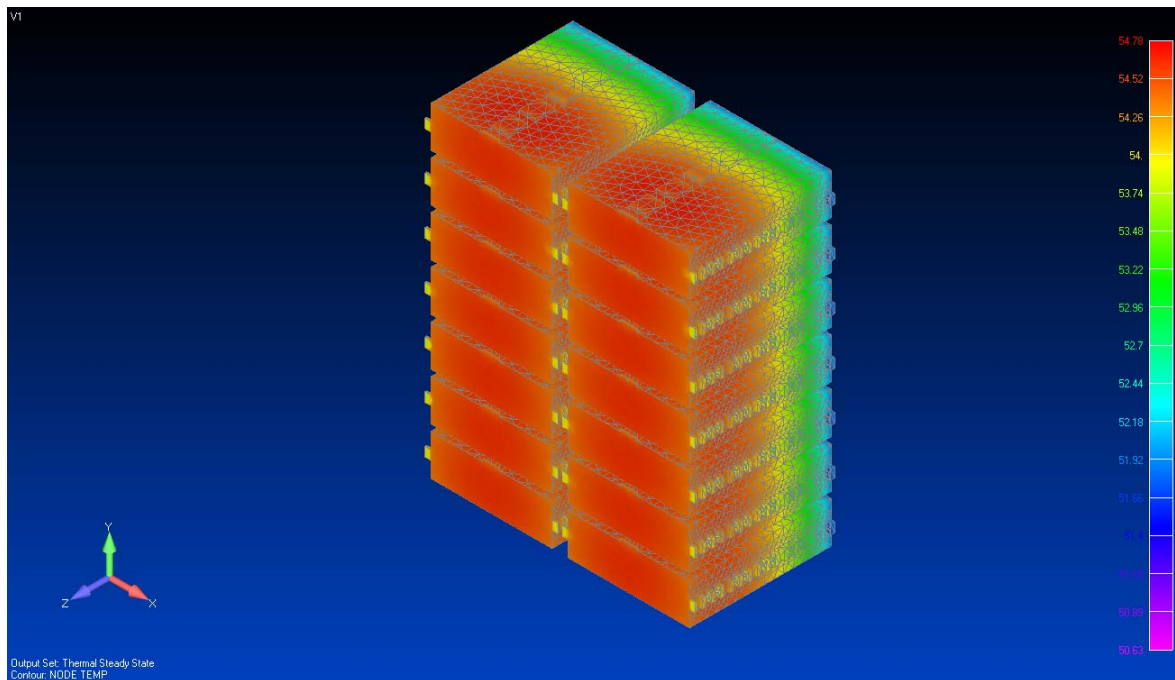
**Figura 7-3: Calor generado durante la carga a 2C,  $h=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ .**

En este segundo caso, las temperaturas obtenidas son:

$$T_{\text{máx}} = 54,782 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$T_{\text{mín}} = 50,603 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Realizando una sección en la parte central del pack de baterías, podemos ver cómo el calor se acumula en el centro de las celdas, y va disminuyendo hacia los extremos:



**Figura 7-4: Sección del calor generado durante la carga a 2C,  $h=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}=40^\circ\text{C}$ .**

#### **7.2.2.2. Calor producido durante la descarga.**

Para los casos en los que se produce la descarga, se ha simulado que es el controlador quien es el encargado de limitar la potencia sustraída de las baterías. Éste, puede trabajar en continuo a un máximo de 45 kW. En nuestro caso, se ha simulado a un valor un poco inferior, de 40 kW, para ver cómo puede ser el funcionamiento normal de las baterías, sin grandes solicitaciones. Este valor se corresponde con exigencias de potencia muy altas, casi las máximas, por lo que será un caso de funcionamiento desfavorable, pero completamente posible de alcanzar<sup>4</sup>. No obstante, el valor máximo de potencia que las baterías son capaces de suministrar es de 106,4 kW, por lo que el limitante en este caso es el controlador.

Entonces, conociendo los valores de la tensión que nos proporciona el pack de baterías en la configuración elegida, obtenemos la intensidad del conjunto, y si la

<sup>4</sup> Según las hojas de características del fabricante del controlador PowerPhase 75 de UQM, la potencia máxima que es capaz de soportar el controlador en continuo es de 45 kW.

dividimos por cada una de las tres ramas en paralelo, obtenemos la intensidad que recorrerá las celdas:

$$40 \text{ kW}/414,4 \text{ V}=96,5251 \text{ Amperios}$$

$$96,5251 \text{ Amperios}/3= 32,175 \text{ Amperios}$$

Por tanto, la potencia generada en forma de calor es:

$$Q_{\text{gen}}= R_{\text{equiv}_3_{\text{paralelo}}} * I^2 = (5 * 10^{-3}) \Omega /3 * (96,525)^2 = 15,528 \text{ W}$$

$$Q_{\text{gen\_total}}= 15,528 \text{ W} * 112 \approx 1740 \text{ W}$$

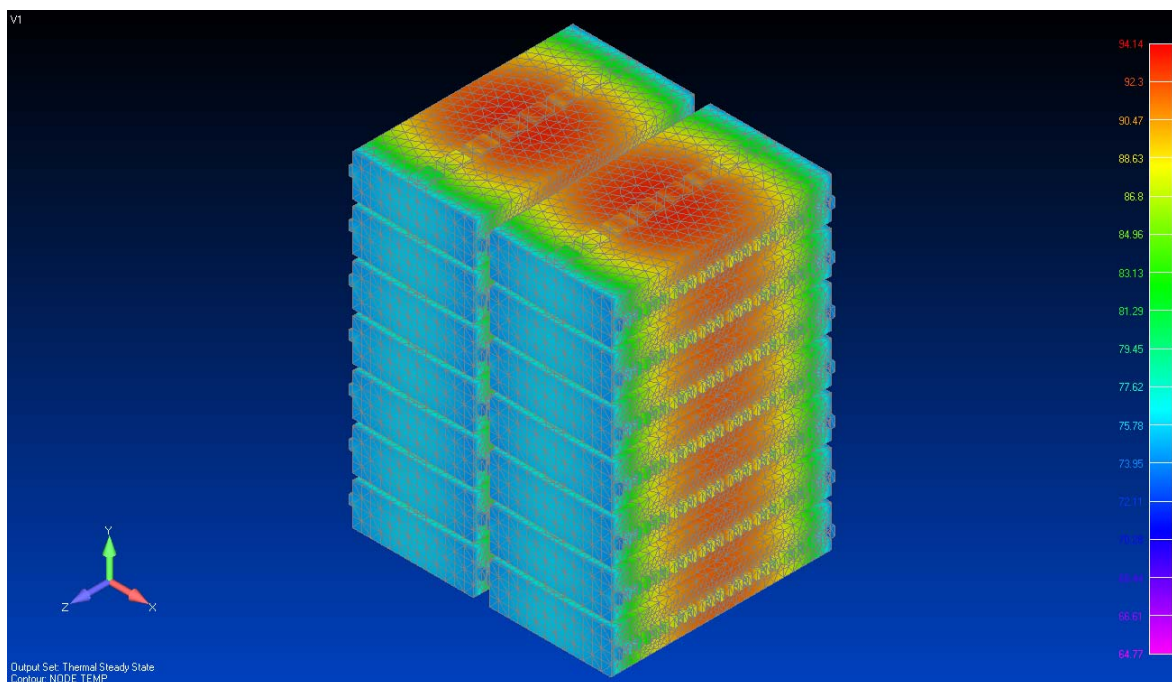
Este valor será igual para todos los casos de la descarga que contemplaremos.

Además, podemos ver la equivalencia en unidades de capacidad, con las siguientes transformaciones:

$$32,175 \text{ Amperios}/ 5,35 \text{ Amperios*hora} = 6,014 \text{ h}^{-1} \approx 6 \text{ C}$$

Esto significa que la descarga en estas condiciones, se estaría efectuando a 6C aproximadamente. Por lo tanto, nos encontramos dentro de los límites aceptables, pues el fabricante recomienda no superar los 16 C en la descarga.

❖ **Descarga con el controlador trabajando a 40 kW, h=20 W/m<sup>2</sup>\*K, Text=25°C.**



**Figura 7-5: Calor generado durante la descarga, h=20 W/m<sup>2</sup>\*K, Text= 25°C.**

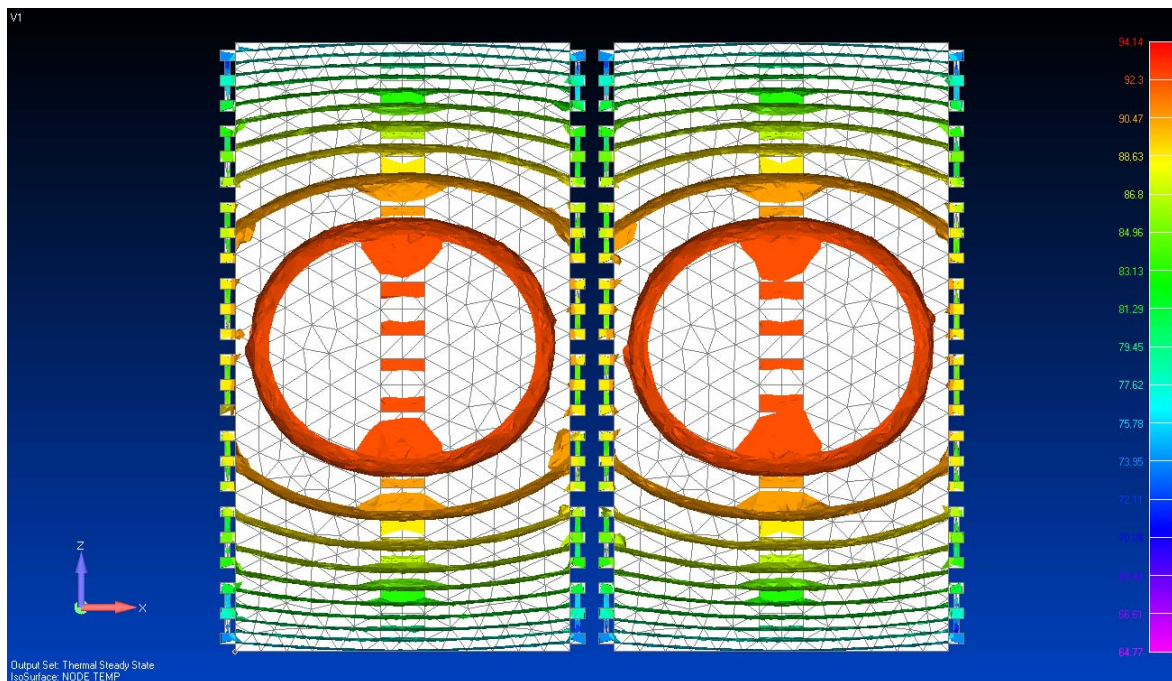


Las temperaturas máximas y mínimas que se alcanzarán con esta configuración son:

$$T_{\text{máx}} = 94,13 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

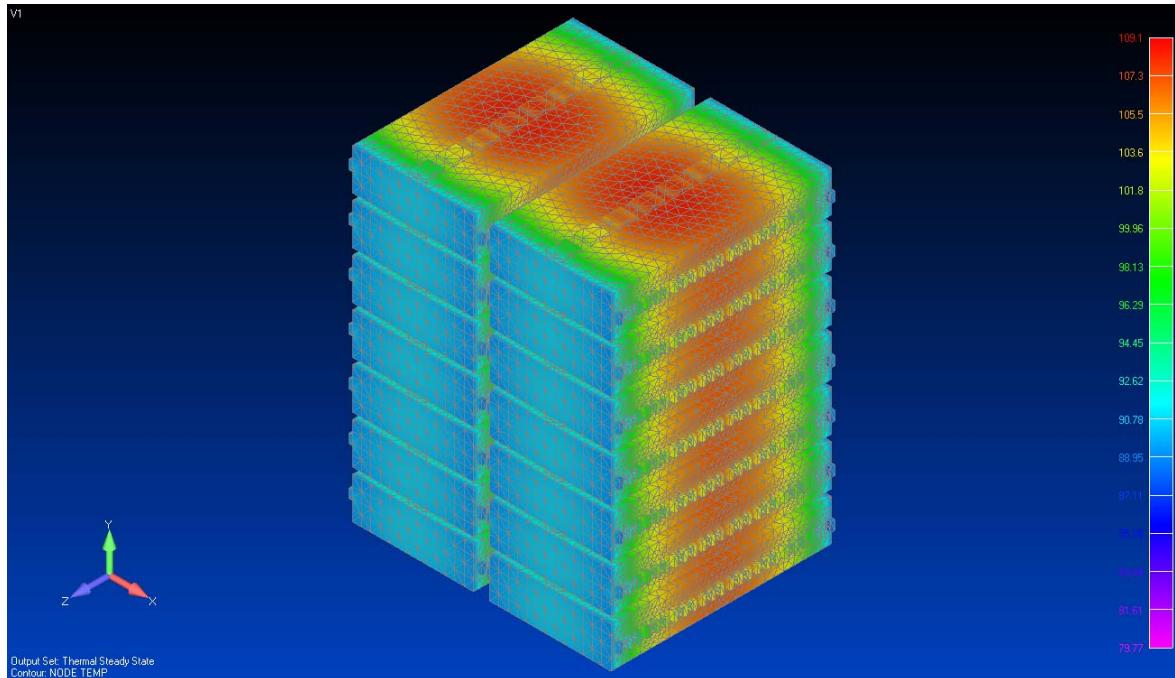
$$T_{\text{mín}} = 66,96 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

En la figura siguiente se muestran las líneas isotermas creadas, desde una vista de la parte superior:



**Figura 7-6: Líneas isotermas durante la descarga,  $h=20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}= 25^{\circ}\text{C}$ .**

❖ Descarga con el controlador trabajando a 40 kW,  $h=20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}=40^\circ\text{C}$ .



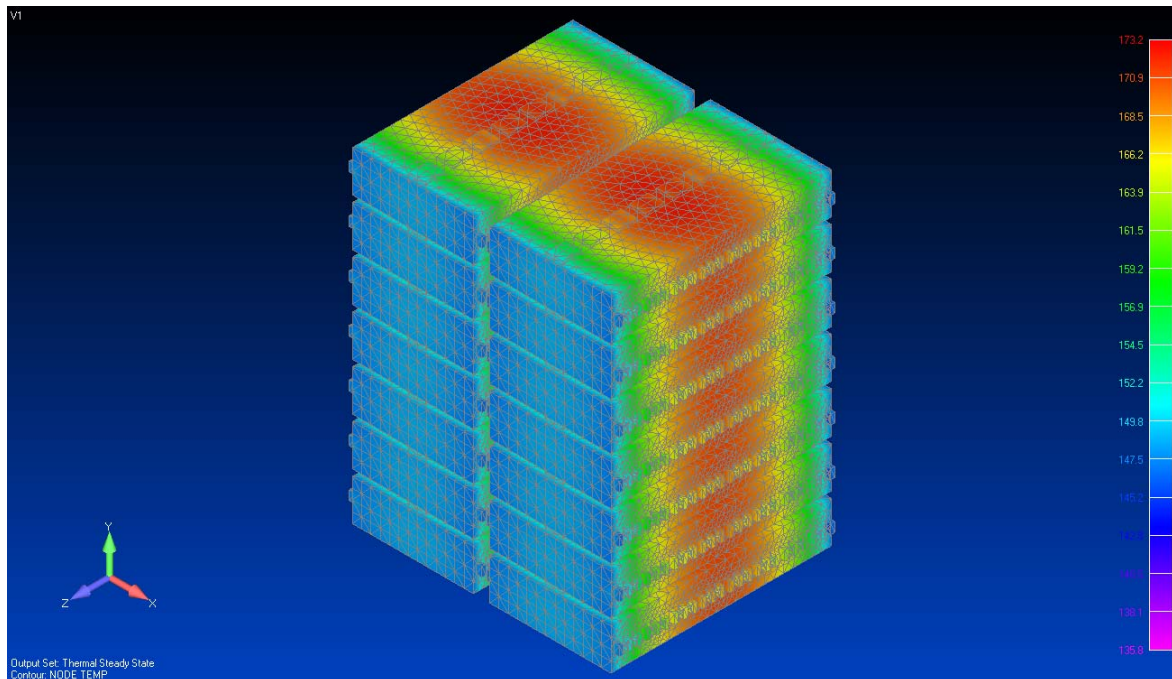
**Figura 7-7: Calor generado durante la descarga,  $h=20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}=40^\circ\text{C}$ .**

Las temperaturas obtenidas son:

$$T_{\text{máx}} = 109,188 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$T_{\text{mín}} = 79,689 \text{ }^\circ\text{C}.$$

❖ **Descarga con el controlador trabajando a 40 kW,  $h=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}=40^\circ\text{C}$ .**



**Figura 7-8: Calor generado durante la descarga,  $h=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ .**

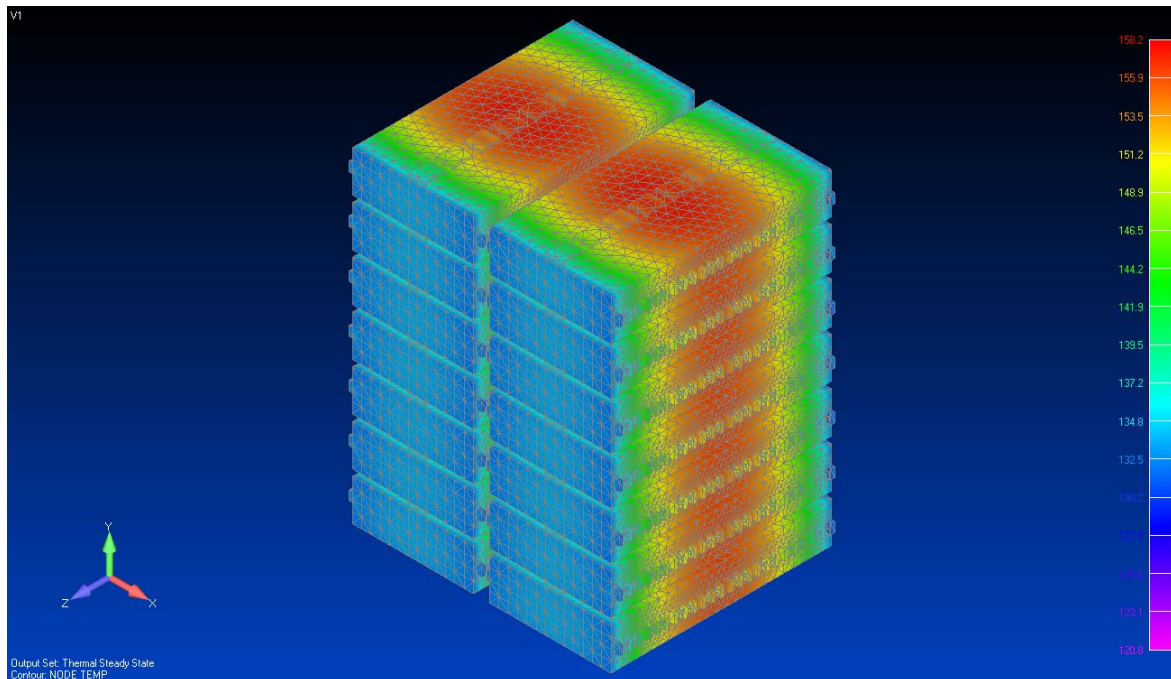
Las temperaturas obtenidas son:

$$T_{\text{máx}} = 173,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$T_{\text{mín}} = 138,3 \text{ }^\circ\text{C}.$$



❖ **Descarga con el controlador trabajando a 40 kW,  $h=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}=25^\circ\text{C}$ .**



**Figura 7-9: Calor generado durante la descarga,  $h=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $T_{\text{ext}}= 25^\circ\text{C}$ .**

Las temperaturas obtenidas son:

$$T_{\text{máx}} = 158,267 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$T_{\text{mín}} = 120,588 \text{ } ^\circ\text{C}.$$



## 8. PRESUPUESTO

## 8. PRESUPUESTO

En esta sección se ha realizado una estimación de los costes en los que se ha incurrido con la realización de este proyecto.

A continuación se presenta el presupuesto desglosado. Como se puede ver, el principal coste en el que se incide es en el correspondiente al personal involucrado. Para estimar este coste se han calculado el número de horas-hombre que han sido necesarias para finalizar este proyecto.

Asimismo, se han tenido en cuenta los costes de amortización del equipo informático empleado, y de las licencias de los programas utilizados.



#### PRESUPUESTO DE PROYECTO

1.- Autor: Cristina Torrejón Pérez

2.- Departamento: Ingeniería Mecánica

3.- Descripción del Proyecto:

- Título: Diseño de un pack de baterías para una motocicleta eléctrica.

- Duración (meses): 9

Tasa de costes Indirectos: 20%

4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):

16.174,00 Euros

5.- Desglose presupuestario (costes directos)

#### PERSONAL

| Apellidos y nombre      | N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo) | Categoría                     | Dedicación (hombres mes) <sup>a)</sup> | Coste hombre mes     | Coste (Euro)                              |
|-------------------------|--|-------------------------------|--|----------------------|---|
| Cristina Torrejón Pérez | XXXXXXXX-X                                       | Ingeniero Senior<br>Ingeniero | 5                                      | 4.289,54<br>2.694,39 | 0,00<br>0,00<br>13.471,95<br>0,00<br>0,00 |
| Hombres mes 5           |  |                               |  | Total                | 13.471,95                                 |

<sup>a)</sup> 1 Hombre mes = 131,25 horas. Máximo anual de dedicación de 12 hombres mes (1575 horas)  
Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8,8 hombres mes (1.155 horas)

#### EQUIPOS

| Descripción           | Coste (Euro) | % Uso dedicado proyecto | Dedicación (meses) | Periodo de depreciación | Coste imputable <sup>d)</sup> |
|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Ordenador             | 600,00       | 10                      | 2                  | 60                      | 2,00                          |
| Licencia Pro-Engineer | 3.500,00     | 5                       | 1                  | 60                      | 1,46                          |
| Licencia Femap        | 3.500,00     | 5                       | 1                  | 60                      | 2,92                          |
|                       |              |                         |                    | 60                      | 0,00                          |
|                       |              |                         |                    | 60                      | 0,00                          |
|                       |              |                         |                    | 60                      | 0,00                          |
|                       |              |                         |                    | Total                   | 6,38                          |

<sup>d)</sup> Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

A = n° de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación (60 meses)

C = coste del equipo (sin IVA)

D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

Finalmente, el resumen de los costes es el siguiente:

#### 6.- Resumen de costes

| Presupuesto Costes Totales | Presupuesto Costes Totales |
|----------------------------|----------------------------|
| Personal                   | 13.472                     |
| Amortización               | 6                          |
| Subcontratación de tareas  | 0                          |
| Costes de funcionamiento   | 0                          |
| Costes Indirectos          | 2.696                      |
| Total                      | 16.174                     |



## 9. CONCLUSIONES

## 9. CONCLUSIONES

Llegados a este punto, estamos en disposición de resumir y depurar lo obtenido durante la realización de este documento.

En primer lugar se realizó un trabajo de investigación, con el fin de obtener información general sobre baterías para vehículos eléctricos. Inicialmente se estudiaron los parámetros más importantes con respecto al funcionamiento de las baterías. Tras conocer dichos parámetros, se estudiaron los diferentes tipos de baterías recargables existentes hasta la fecha. Los parámetros anteriores nos sirvieron para comparar los diferentes tipos de batería entre sí y poder elegir la más adecuada para nuestro propósito.

Las características que ha de cumplir la batería seleccionada son las que se enuncian a continuación:

- Alta densidad de energía y alta energía específica para conseguir sistemas de dimensiones más reducidas y de menor peso.
- Alta eficiencia energética.
- Baja razón de auto-descarga, para minimizar las pérdidas.
- Larga vida útil, para compensar los costes iniciales.
- Independencia de las condiciones ambientales, que posibiliten un buen comportamiento ante variaciones climáticas extremas.
- Diseño robusto preparado para resistir sobrecargas eléctricas, vibraciones, golpes, etc.
- Diseño respetuoso con el medio ambiente.
- Bajo mantenimiento para reducir costes.
- Bajo coste.

Tras este análisis, se concluyó que el tipo de batería que mejor se ajusta a las necesidades del vehículo eléctrico es el segmento de las baterías de litio. El resto de modelos ha sido rechazado por los motivos que a continuación se presentan:

- Los súper-condensadores aún no son una tecnología lo suficientemente madura para su empleo, y además resultan caros.

- Las baterías de Níquel-Cadmio y Níquel Metal Hidruro presentan el denominado “efecto memoria”.
- Las baterías de ácido poseen una baja energía específica, y también tienen el inconveniente de que no soportan bien las descargas profundas.

Una vez seleccionadas las baterías de litio, continuamos el estudio con un análisis de los diferentes modelos de celdas basadas en la tecnología del litio que se pueden encontrar a día de hoy en el mercado. Tras revisar la documentación ofrecida por los fabricantes, se decidió optar por seleccionar las baterías con mayor energía específica. Las elegidas fueron las que presentaban una energía específica mayor a 150 Wh/kg. De estas, se eliminaron varias, y, seleccionado la mejor de cada marca, el abanico de posibilidades se redujo a tres fabricantes. De este grupo, elegimos las de la marca Enerland (modelo PQ-5350 LP) por ser las que mayor energía específica poseen, junto con el mayor voltaje, y también por ser las únicas que nos ofrecen datos de su impedancia interna.

Seguidamente pasamos a realizar un diseño del bloque completo de baterías, teniendo en cuenta las necesidades de potencia, tensión e intensidad del controlador. Tras barajar varias posibilidades, se decide diseñar una configuración 112s3p. Este diseño se realiza con el programa Pro-Engineer.

En un principio se realizó un estudio térmico unidimensional, con el que se obtuvieron unas temperaturas máximas en las celdas demasiado elevadas para nuestro propósito. Por ello, se pasó a realizar un análisis más minucioso, realista y fiable con ayuda del programa Femap.

El diseño realizado con Pro-Engineer fue importarlo desde Femap para poder realizar el análisis de temperaturas. Gracias a este programa, pudimos comprobar cuál es el comportamiento térmico de las celdas. Las temperaturas alcanzadas en los casos estudiados son las siguientes:

| CASOS:  | $T_{\min}$ (°C) | $T_{\max}$ (°C) |
|---|-----------------|-----------------|
| CARGA A 1 C: $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ .    | 42,637          | 43,676          |
| CARGA A 2 C: $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ .    | 50,603          | 54,782          |
| DESCARGA ELEVADA: $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 25^\circ\text{C}$ | 66,96           | 94,13           |
| DESCARGA ELEVADA: $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ | 79,689          | 109,188         |
| DESCARGA ELEVADA: $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 40^\circ\text{C}$ | 138,3           | 173,2           |
| DESCARGA ELEVADA: $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $T_{\text{ext}}= 25^\circ\text{C}$ | 120,588         | 158,267         |

**Tabla 9-1: Temperaturas obtenidas con Femap para los diferentes casos.**

De los resultados obtenidos en esta tabla, podemos sacar estas conclusiones:

- Para los valores recomendados de carga (1C y 2C) observamos que las temperaturas alcanzadas están cercanas a los  $50^\circ\text{C}$ . Esta temperatura es óptima para el funcionamiento de las baterías, puesto que no es conveniente ni una temperatura más elevada que ésta, ni una temperatura demasiado baja. Estos valores de capacidad se corresponden con unas velocidades punta que superan los 100 km/h, según las referencias [13] y [14]. Por tanto, podemos concluir que para un uso urbano, no sería necesario incorporar un sistema de refrigeración.
- Para los casos de funcionamiento bajo descarga elevada (equivalente a una tasa de descarga de 6C), las velocidades alcanzadas llegan a los 190 km/h. Por tanto, este caso es el correspondiente al funcionamiento en carretera de la moto, donde las solicitaciones serán máximas. Como podemos ver en la tabla anterior, las temperaturas alcanzadas en estos casos, dependiendo de las condiciones de contorno, son más elevadas, oscilando las temperaturas máximas entre los  $94^\circ\text{C}$  y los  $173^\circ\text{C}$ . Ya es conocido, que la temperatura máxima recomendada por el fabricante es de  $85^\circ\text{C}$ , por lo que en este caso, sí que sería necesario implantar un sistema de refrigeración para mantener en el mejor estado posible el pack de baterías.



- Como ya hemos mencionado en numerosas ocasiones a lo largo de este documento, el BMS será el sistema encargado de gestionar el funcionamiento de las celdas que componen la batería. El BMS actuará de protector de las celdas, impidiendo que las mismas alcancen temperaturas demasiado elevadas, que puedan dañarlas o que incluso puedan provocar situaciones peligrosas, tales como escapes de gases, inflamaciones de las celdas e incluso explosiones. El sistema BMS se encargará de evitar en todo lo posible un envejecimiento prematuro de las celdas. Dado el gran desembolso que supone la batería en un vehículo eléctrico, es lógico tratar de mantener en el mejor estado posible la misma, durante el mayor tiempo posible.
- Fijándonos detenidamente en las imágenes obtenidas con Femap, podemos ver cómo la distribución de temperaturas, en cada conjunto de ocho celdas, apiladas una tras otra, es independientemente de su posición en el pack. Es decir, los conjuntos colocados en los extremos, se comportan de manera idéntica a los colocados en el centro del pack. Este resultado nos lleva a la conclusión de que la disposición elegida no provoca interferencias del calor producido en unos conjuntos para con los demás. Por tanto, esta configuración es admisible, e incluso se podrían reducir los espacios dejados entre los bloques de celdas para facilitar la evacuación del calor, lo que causaría un pack de menores dimensiones.



## 10. TRABAJOS FUTUROS

## 10. TRABAJOS FUTUROS

Finalizado este trabajo, nos planteamos la conveniencia de analizar en trabajos posteriores otros aspectos que, por su gran extensión y dedicación, se salen de los objetivos de este proyecto, y que a continuación se explican a modo de recomendación:

- Las necesidades de refrigeración deberán ser estudiadas con detenimiento, para conocer qué tipo es el más adecuado en este caso (refrigeración por aire, agua, etc.,)
- Se deberán estudiar las temperaturas alcanzadas con las distintas formas de refrigeración, así como también probar con diferentes ubicaciones de los bloques que conforman el pack completo. Dependiendo del espacio disponible para ubicar las baterías en el vehículo para el que están destinadas, se podrán idear bloques de celdas, que se puedan colocar unidos, formando un solo bloque, o se podrán separar y distribuir por diferentes espacios en el vehículo.



## 11. REFERENCIAS

## 11. REFERENCIAS.

- [1]BUCHMANN I. "Batteries in a portable world." Cadex Electronics Inc. Segunda Edición.
- [2]<http://www.tecnicaindustrial.es/TIFrontal/a-152-El-gran-reto-petroleo--inversion.aspx> Consulta 13/11/2009.
- [3]CEÑA A., SANTAMARTA J. (2009) "Coche eléctrico, el futuro del transporte". Energías renovables, 75.
- [4]<http://www.electrovaya.com/innovation/other/pcd.aspx> Consulta 02/11/09.
- [5]<http://www.uqm.com/pdfs/PP75%20Spec%20Sheet%204.21.10.pdf> Consulta 06/12/09.
- [6]<http://www.sevcon.com/PDFs/G80%20Datasheet%20G801109B.pdf> Consulta 06/12/09.
- [7][http://www.nedra.com/record\\_holders.html](http://www.nedra.com/record_holders.html) Consulta 16/02/2010.
- [8]<http://ir.a123systems.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=430981> Consulta 12/02/2010.
- [9]STUART T., WANG X., ASHTIANI C., PESARAN A. "A modular Battery Management System for HEVs". The University of Toledo, Ohio, E.E.U.U, Junio 2002.
- [10] <http://liionbms.com/php/index.php> Consulta 03/03/2010.
- [11]H.FRANK, P. SHAKKOTTAI, B.V. RATNAKUMAR, M. SMART, C. HUANG, P. TIMMERMAN AND S. SURAMPUDI. "Thermal aspects of lithium cells". Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- [12]INCROPERA F., DeWITT D (1999) "Fundamentos de transferencia de calor". Ed. Pearson, Cuarta edición.
- [13]COSSALTER V. (2006) "Motorcycle Dynamics" Lightning Source Inc. Segunda Edición.
- [14]COCCO G. (2004) "Motorcycle design and technology". Motorbooks.
- [15]DHAMEJA S. (2002)."Electric Vehicle Battery Systems". Butterworth- Heinemann.
- [16]LARMINIE J., LOWRY J. (2003) "Electric vehicle technology explained". John Wiley & Sons, Ltd.

- [17]LEITMAN S., BRANT B. (2009). "Build your own Electric Vehicle". Segunda edición. McGrawHill.
- [18]Varios autores. "Guía del vehículo eléctrico". Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- [19]BERDICHEVSKY, G., KELTY, K., STRAUBEL, J.B., and TOOMRE, E. (2006) The Tesla Roadster Battery System, [http://www.teslamotors.com/display\\_data/TeslaRoadsterBatterySystem.pdf](http://www.teslamotors.com/display_data/TeslaRoadsterBatterySystem.pdf) (Febrero 2010). Consulta 28/03/10.
- [20]IEEE Spectrum Magazine (2007, August 29). Lithium Batteries For Hybrid Electric Cars. ScienceDaily:  
<http://www.sciencedaily.com/releases/2007/08/070823183654.htm>  
Consulta 08/10/09.
- [21]<http://www.malaciencia.info/2008/01/bateras-y-el-efecto-memoria.html> Consulta 28/09/09.
- [22]<http://e-articles.info/t/i/985/l/es/> Consulta 25/09/09 .
- [23]<http://www.a123systems.com/> Consulta 25/09/09.
- [24]<http://www.altairnano.com/profiles/investor/fullpage.asp?f=1&BzID=546&to=cp&Nav=0&LangID=1&s=0&ID=10724> Consulta 25/09/09.
- [25]<http://www.teslamotors.com/> Consulta 01/10/09.
- [26]<http://www.avele.org/> Consulta 01/10/09.
- [27]<http://www.vectrixmovement.com/> Consulta 01/10/09.
- [28]<http://www.motociclismo.es/Pruebas/vectrix-vectrix-electric-vectrix-3w-motor-electrico-scooter-electrico-kw-contacto.jsp%3Fid%3D4020> Consulta 01/10/09.
- [29]<http://www.brammo.com/company/?lang=es> Consulta 01/10/09.
- [30]<http://www.circontrol.com/archives/14095/es/> Consulta 01/10/09.
- [31][https://www.chryslergroupllc.com/en/innovation/envi/specs/dodge\\_vehicles.php](https://www.chryslergroupllc.com/en/innovation/envi/specs/dodge_vehicles.php) Consulta 01/10/09.
- [32]<http://www.cienciateca.com/ctslibat.html> Consulta 05/10/09.
- [33]<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1161274/Scientists-develop-mobile-phone-battery-charged-just-10-seconds.html> Consulta 05/10/09.
- [34]<http://www.bereco.es/> Consulta 06/10/09.



- [35]<http://www.elcoheecoelectrico.com/> Consulta 06/10/09.
- [36]<http://www.valence.com> Consulta 08/10/09.
- [37]<http://www.enertechint.com/> Consulta 08/10/09.
- [38]<http://www.thunder-sky.com/> Consulta 08/10/09.
- [39]<http://www.kokam.com> Consulta 08/10/09.
- [40]<http://www.electrovaya.com/> Consulta 08/10/09.
- [41]<http://www.compactpower.com/index.shtml> Consulta 08/10/09.
- [42][www.maxwell.com/ultracapacitors](http://www.maxwell.com/ultracapacitors) Consulta 09/10/09.
- [43]<http://www.lgchem.com/> Consulta 27/10/09.
- [44]<http://www.ev-li-ionbatteryforum.com/> Consulta 29/03/10.



## ANEXOS





## ANEXO I. Características de las celdas analizadas.

| FABRICANTE Y MODELO           | Alto (mm) | Ancho (mm) | Espesor (mm) | Vol (dm3) | nº de celdas | Voltaje/celda (V) | Voltaje total (V) | Capacidad (Ah) | Peso/celda (grs.) | Peso pack (kg) | Wh/celda | Wh total | Wh/kg |
|-------------------------------|-----------|------------|--------------|-----------|--------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|----------|----------|-------|
| Altairnano 50Ah               | 256       | 259        | 13           | 0,861952  | 21           | 2,3               | 48,3              | 50             | 1600              | 33,6           | 115,0    | 2415,0   | 71,9  |
| Altairnano 11Ah               | 207       | 129        | 8            | 0,213624  | 85           | 2,3               | 195,5             | 11             | 366               | 31,1           | 25,3     | 2150,5   | 69,1  |
| Valence cilíndrica            | 65        | 18,2       | 18,2         | 0,021530  | 837          | 3,2               | 2678,4            | 1,4            | 40                | 33,5           | 4,5      | 3749,8   | 112,0 |
| A123 Anr 26650 M1a cilíndrica | 66        | 26         | 26           | 0,044616  | 404          | 3,3               | 1333,2            | 2,3            | 70                | 28,3           | 7,6      | 3066,4   | 108,4 |
| LG Chem E1                    | 202       | 94,5       | 7,3          | 0,139349  | 130          | 3,85              | 500,5             | 10             | 245               | 31,9           | 38,5     | 5005,0   | 157,1 |
| LG Chem E2                    | 201,5     | 93,6       | 4,7          | 0,088643  | 204          | 3,8               | 775,2             | 6              | 160               | 32,6           | 22,8     | 4651,2   | 142,5 |
| Enertech SPB 451835a1         | 35        | 18         | 4,5          | 0,002835  | 6350         | 3,7               | 23495             | 0,2            | 4,6               | 29,2           | 0,7      | 4699,0   | 160,9 |
| Enertech SPB 9345136 UH1      | 138       | 45         | 9,6          | 0,059616  | 302          | 3,7               | 1117,4            | 4,4            | 120               | 36,2           | 16,3     | 4916,6   | 135,7 |
| Ukai LIR 063450A              | 50        | 34,2       | 6,3          | 0,010773  | 1671         | 3,7               | 6182,7            | 1,05           | 23,8              | 39,8           | 3,9      | 6491,8   | 163,2 |
| Ukai LIR 103450A              | 50        | 34         | 10,4         | 0,01768   | 1019         | 3,7               | 3770,3            | 1,8            | 41,2              | 42,0           | 6,7      | 6786,5   | 161,7 |
| Ukai LIR 18650                | 64,5      | 18,2       | 18,2         | 0,021364  | 843          | 3,7               | 3119,1            | 2,2            | 49                | 41,3           | 8,1      | 6862,0   | 166,1 |
| Ukai 8867220 Fullwatt         | 220       | 67         | 8,8          | 0,129712  | 139          | 3,7               | 514,3             | 9,7            | 258               | 35,9           | 35,9     | 4988,7   | 139,1 |
| Ukai 167062 Fullwatt          | 62        | 70         | 15,8         | 0,068572  | 263          | 3,7               | 973,1             | 6              | 130               | 34,2           | 22,2     | 5838,6   | 170,8 |



| FABRICANTE Y MODELO  | Alto (mm) | Ancho (mm) | Espesor (mm) | Vol. (dm3) | nº de celdas | Voltaje/celda (v) | Voltaje total (v) | Capacidad (ah) | Peso/celda (grs.) | Peso pack (kg) | Wh/celda | Wh total | Wh/kg |
|----------------------|-----------|------------|--------------|------------|--------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|----------|----------|-------|
| KOKAM SLPB 55205130H | 208       | 132        | 5,9          | 0,161990   | 112          | 3,7               | 414,4             | 11             | 292               | 32,7           | 40,7     | 4558,4   | 139,4 |
| KOKAM SLPB 160460330 | 455       | 325        | 16           | 2,366      | 8            | 3,7               | 29,6              | 240            | 5000              | 40,0           | 888,0    | 7104,0   | 177,6 |
| KOKAM SLPB 53460330  | 455       | 325        | 5,3          | 0,783737   | 23           | 3,7               | 85,1              | 70             | 1700              | 39,1           | 259,0    | 5957,0   | 152,4 |
| KOKAM SLPB 70460330  | 455       | 325        | 7,2          | 1,0647     | 17           | 3,7               | 62,9              | 100            | 2320              | 39,4           | 370,0    | 6290,0   | 159,5 |
| KOKAM SLPB 140460330 | 455       | 325        | 14           | 2,07025    | 9            | 3,7               | 33,3              | 200            | 4440              | 40,0           | 740,0    | 6660,0   | 166,7 |
| KOKAM SLPB 75106205  | 205       | 106        | 7,5          | 0,162975   | 111          | 3,7               | 410,7             | 16             | 330               | 36,6           | 59,2     | 6571,2   | 179,4 |
| KOKAM SLPB 75106100  | 106       | 100        | 7,5          | 0,0795     | 227          | 3,7               | 839,9             | 7,5            | 155               | 35,2           | 27,8     | 6299,3   | 179,0 |
| Enerland PQ 0300XP   | 48        | 22         | 4,2          | 0,004435   | 4059         | 3,7               | 15018,3           | 0,3            | 8,2               | 33,3           | 1,1      | 4505,5   | 135,4 |
| Enerland PQ 0800XP   | 62        | 34         | 8,9          | 0,018761   | 960          | 3,7               | 3552              | 0,8            | 23                | 22,1           | 3,0      | 2841,6   | 128,7 |
| Enerland PQ-4500XQ   | 152       | 44         | 7,8          | 0,052166   | 346          | 3,7               | 1280,2            | 4,5            | 112               | 38,8           | 16,7     | 5760,9   | 148,7 |
| Enerland PQ-6000XP   | 152       | 44         | 10,3         | 0,068886   | 262          | 3,7               | 969,4             | 6              | 147               | 38,5           | 22,2     | 5816,4   | 151,0 |
| Enerland PQ-5350LP   | 128       | 43         | 9,7          | 0,053388   | 338          | 3,7               | 1250,6            | 5,35           | 110               | 37,2           | 19,8     | 6690,7   | 180,0 |
| Gaia Hp 602030 NCA   | 232       | 60         | 60           | 0,8352     | 22           | 3,6               | 79,2              | 45             | 1500              | 33,0           | 162,0    | 3564,0   | 108,0 |
| Gaia HE 602030 NCA   | 232       | 60         | 60           | 0,8352     | 22           | 3,6               | 79,2              | 55             | 1500              | 33,0           | 198,0    | 4356,0   | 132,0 |
| Gaia Hp 601300 NCA   | 159       | 60         | 60           | 0,5724     | 32           | 3,6               | 115,2             | 27             | 980               | 31,4           | 97,2     | 3110,4   | 99,2  |



## ***ANEXO II. Características resumidas de las celdas analizadas.***

| <b>MODELO</b>                 | <b>nº de celdas</b> | <b>Voltaje/celda (V)</b> | <b>Voltaje total (V)</b> | <b>Capacidad (Ah)</b> | <b>Peso/celda (grs.)</b> | <b>Wh/celda</b> | <b>Wh total</b> | <b>Wh/kg</b> |
|-------------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Altairnano 50Ah               | 21                  | 2,3                      | 48,3                     | 50                    | 1600                     | 115             | 2415            | 72           |
| Altairnano 11Ah               | 85                  | 2,3                      | 195,5                    | 11                    | 366                      | 25              | 2151            | 69           |
| Valence cilíndrica            | 837                 | 3,2                      | 2678,4                   | 1,4                   | 40                       | 4               | 3750            | 112          |
| A123 Anr 26650 M1a cilíndrica | 404                 | 3,3                      | 1333,2                   | 2,3                   | 70                       | 8               | 3066            | 108          |
| LG Chem E1                    | 130                 | 3,85                     | 500,5                    | 10                    | 245                      | 39              | 5005            | 157          |
| LG Chem E2                    | 204                 | 3,8                      | 775,2                    | 6                     | 160                      | 23              | 4651            | 143          |
| Enertech SPB 451835a1         | 6350                | 3,7                      | 23495                    | 0,2                   | 4,6                      | 1               | 4699            | 161          |
| Enertech SPB 9345136 UH1      | 302                 | 3,7                      | 1117,4                   | 4,4                   | 120                      | 16              | 4917            | 136          |
| Ukai LIR 063450A              | 1671                | 3,7                      | 6182,7                   | 1,05                  | 23,8                     | 4               | 6492            | 163          |
| Ukai LIR 103450A              | 1019                | 3,7                      | 3770,3                   | 1,8                   | 41,2                     | 7               | 6787            | 162          |
| Ukai LIR 18650                | 843                 | 3,7                      | 3119,1                   | 2,2                   | 49                       | 8               | 6862            | 166          |
| Ukai 8867220 Fullwatt         | 139                 | 3,7                      | 514,3                    | 9,7                   | 258                      | 36              | 4989            | 139          |
| Ukai 167062 Fullwatt          | 263                 | 3,7                      | 973,1                    | 6                     | 130                      | 22              | 5839            | 171          |
| KOKAM SLPB 55205130H          | 112                 | 3,7                      | 414,4                    | 11                    | 292                      | 41              | 4558            | 139          |
| KOKAM SLPB 160460330          | 8                   | 3,7                      | 29,6                     | 240                   | 5000                     | 888             | 7104            | 178          |
| KOKAM SLPB 53460330           | 23                  | 3,7                      | 85,1                     | 70                    | 1700                     | 259             | 5957            | 152          |
| KOKAM SLPB 70460330           | 17                  | 3,7                      | 62,9                     | 100                   | 2320                     | 370             | 6290            | 159          |
| KOKAM SLPB 140460330          | 9                   | 3,7                      | 33,3                     | 200                   | 4440                     | 740             | 6660            | 167          |
| KOKAM SLPB 75106205           | 111                 | 3,7                      | 410,7                    | 16                    | 330                      | 59              | 6571            | 179          |
| KOKAM SLPB 75106100           | 227                 | 3,7                      | 839,9                    | 7,5                   | 155                      | 28              | 6299            | 179          |



| MODELO             | nº de celdas | Voltaje/celda (V) | Voltaje total (V) | Capacidad (Ah) | Peso/celda (grs.) | Wh/celda | Wh total | Wh/kg |
|--------------------|--------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------|----------|-------|
| Enerland PQ 0300XP | 4059         | 3,7               | 15018,3           | 0,3            | 8,2               | 1        | 4505     | 135   |
| Enerland PQ 0800XP | 960          | 3,7               | 3552              | 0,8            | 23                | 3        | 2842     | 129   |
| Enerland PQ-4500XQ | 346          | 3,7               | 1280,2            | 4,5            | 112               | 17       | 5761     | 149   |
| Enerland PQ-6000XP | 262          | 3,7               | 969,4             | 6              | 147               | 22       | 5816     | 151   |
| Enerland PQ-5350LP | 338          | 3,7               | 1250,6            | 5,35           | 110               | 20       | 6691     | 180   |
| Gaia Hp 602030 NCA | 22           | 3,6               | 79,2              | 45             | 1500              | 162      | 3564     | 108   |
| Gaia HE 602030 NCA | 22           | 3,6               | 79,2              | 55             | 1500              | 198      | 4356     | 132   |
| Gaia Hp 601300 NCA | 32           | 3,6               | 115,2             | 27             | 980               | 97       | 3110     | 99    |



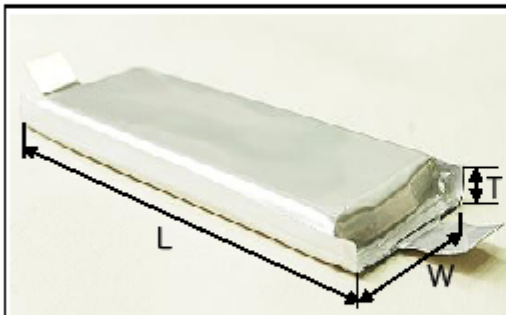
### ***ANEXO III. Modelos de celdas con energía específica >150Wh/kg.***

| <b>FABRICANTE Y MODELO</b> | <b>nº de celdas</b> | <b>Voltaje/celda (v)</b> | <b>Voltaje total (v)</b> | <b>Capacidad(Ah)</b> | <b>Peso/celda (grs.)</b> | <b>Wh/celda</b> | <b>Wh total</b> | <b>Wh/kg</b> |
|----------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| LG Chem E1                 | 130                 | 3,85                     | 500,5                    | 10                   | 245                      | 38,5            | 5005,0          | 157,1        |
| Enertech SPB 451835a1      | 6350                | 3,7                      | 23495                    | 0,2                  | 4,6                      | 0,7             | 4699,0          | 160,9        |
| Ukai LIR 063450A           | 1671                | 3,7                      | 6182,7                   | 1,05                 | 23,8                     | 3,9             | 6491,8          | 163,2        |
| Ukai LIR 103450A           | 1019                | 3,7                      | 3770,3                   | 1,8                  | 41,2                     | 6,7             | 6786,5          | 161,7        |
| Ukai LIR 18650             | 843                 | 3,7                      | 3119,1                   | 2,2                  | 49                       | 8,1             | 6862,0          | 166,1        |
| Ukai 167062 Fullwatt       | 263                 | 3,7                      | 973,1                    | 6                    | 130                      | 22,2            | 5838,6          | 170,8        |
| KOKAM SLPB 160460330       | 8                   | 3,7                      | 29,6                     | 240                  | 5000                     | 888,0           | 7104,0          | 177,6        |
| KOKAM SLPB 53460330        | 23                  | 3,7                      | 85,1                     | 70                   | 1700                     | 259,0           | 5957,0          | 152,4        |
| KOKAM SLPB 70460330        | 17                  | 3,7                      | 62,9                     | 100                  | 2320                     | 370,0           | 6290,0          | 159,5        |
| KOKAM SLPB 140460330       | 9                   | 3,7                      | 33,3                     | 200                  | 4440                     | 740,0           | 6660,0          | 166,7        |
| KOKAM SLPB 75106205        | 111                 | 3,7                      | 410,7                    | 16                   | 330                      | 59,2            | 6571,2          | 179,4        |
| KOKAM SLPB 75106100        | 227                 | 3,7                      | 839,9                    | 7,5                  | 155                      | 27,8            | 6299,3          | 179,0        |
| Enerland PQ-6000XP         | 262                 | 3,7                      | 969,4                    | 6                    | 147                      | 22,2            | 5816,4          | 151,0        |
| Enerland PQ-5350LP         | 338                 | 3,7                      | 1250,6                   | 5,35                 | 110                      | 19,8            | 6690,7          | 180,0        |

## ANEXO IV. Hoja de características de Enerland PQ5350LP.

# Enerland

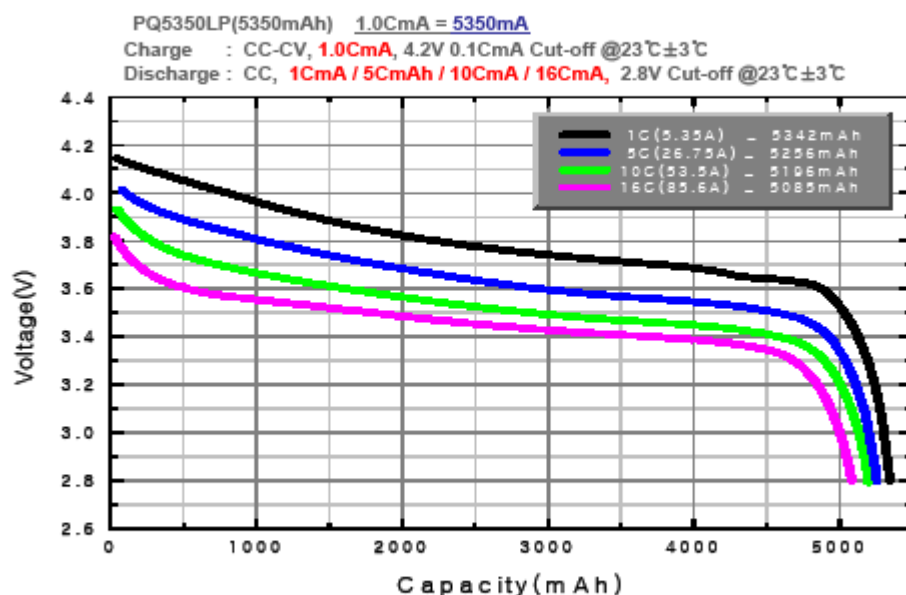
### Specification



| ITEMS          |       | (mm)            | (inch)          |
|----------------|-------|-----------------|-----------------|
| CELL DIMENSION | T     | $9.7 \pm 0.2$   | $0.38 \pm 0.01$ |
|                | W     | $43.0 \pm 1.0$  | $1.70 \pm 0.04$ |
|                | L     | $128.0 \pm 2.0$ | $5.03 \pm 0.08$ |
| WEIGHT         | gram  | Max. 110.0      |                 |
|                | ounce | Max. 3.88       |                 |

| TYPE : Li-ion Polymer Battery |               | PQ5350LP            |
|-------------------------------|---------------|---------------------|
| NOMINAL CAPACITY (mAh)        |               | 5350(5.35Ah)        |
| NOMINAL VOLTAGE (Volt)        |               | 3.7                 |
| IMPEDANCE at 1KHz (mΩ)        |               | Max. 5.0            |
| CHARGE                        | CURRENT (A)   | Max. 10.5 (2C)      |
|                               | VOLTAGE (V)   | Max. 4.2            |
| DISCHARGE                     | CONTINUOUS(A) | Max. 85.6 (16C)     |
|                               | BURST(A)      | Max. 133.8 (25C)    |
|                               | VOLTAGE (V)   | Min. 2.8            |
| CYCLE LIFE<br>70% Retention   | 1C/1C         | 500cycle            |
|                               | 1C/16C        | 50cycle             |
| CELL STATUS ON SHIPMENT       |               | Half Charged (3.8V) |

### Rate Characteristics



Enerland Co., Ltd



## ***ANEXO V. Instrucciones de seguridad para baterías de polímeros de litio proporcionadas por Enerland.***

### **IMPORTANT SAFETY INSTRUCTIONS AND WARNINGS For LITHIUM POLYMER BATTERIES**

- You must read these safety instructions and warnings before using or charging your batteries.
- ***Lithium Polymer(LiPo) batteries are volatile.*** Failure to read and follow the below instructions may result in fire, personal injury and damage to property if charged or used improperly.
- LiPo battery & packs may explode and cause fire if misuse or defective. We require all LiPo batteries & packs buyers must be professionals and have capability to handle emergency.
- **By purchasing LiPo battery, the buyer assumes all risks associated with LiPo batteries. If you do not agree with these conditions, please consider NiMH or NiCd battery or return the battery immediately before use.**
- Must keep LiPo battery pack away from children.
- Test battery properties is your own responsibility. Please test LiPo battery you bought from us before using or sell to your customer to ensure battery can be operated properly and safely in your device.
- **We DO NOT responsible for any damages and consequences damages caused by misusing and modified battery pack.**

#### **Initial Use.**

LiPo batteries are supplied partly charged. Fully charge before first use.

#### **Next Use**

Avoid frequent full discharges because this puts additional strain on the battery.

Several partial discharges with frequent recharges are better for LiPos than one deep one. Recharging a partially charged LiPos do not cause harm. Short battery life is mainly caused by heat rather than charge/discharge patterns.



## ***ANEXO VI. Advertencias e instrucciones de carga de Enerland.***

### **Charging Guidelines and Warnings**

1. **Use Lithium Polymer (LiPo) charger only.** Do not use a NiMH or NiCd charger - Failure to do so may cause fire, which may result in personal injury and property damage. Some LiPo chargers on the market may have technical deficiencies that may cause it to charge the LiPo batteries incorrectly or at an improper rate. It is your responsibility solely to assure the charger you purchased works properly.
2. **Never charge batteries unattended.** When charging LiPo batteries you should always remain in constant observation to monitor the charging process and react to potential problems that may occur. If you notice anything abnormal happening to the battery pack during charging, the charging process must be stopped immediately, disconnect the battery and put in a safe place away from all flammable materials for at least 30 minutes. Unusual signs during charging include excessive heating, odd smells, smoking, ballooning or swelling of the battery pack. A safe place would normally be outside, away from any vehicle or dwelling place.
3. **Never** Charge your LiPo cells or packs **on flammable materials such as wood, foam or plastic. Use a fire proof container.** Have sand or dry fire extinguisher handy for the event of fire.
4. Do not charge at a rate greater than the allowed rate of the pack. Please ask seller max. allowed charging rate . Charging at higher rates may cause cell damage or a fire. Battery life will be reduced significantly when charged over allowed rate.
5. Cell count selection on your charger is vital when charging. Please double-check that you have the charger set for the **correct number of series cells** in your battery pack before you connect the battery.
6. Allow battery to cool to ambient temperature before commencing charging.
7. Do not charge battery packs in series. Charge each one separately. If you start charging a pack with the charger not set for the correct cell count, a fire could result.





8. You have to check pack voltage prior to charging. Do not attempt to charge any pack whose voltage per cell is lower than 2.2 Volts. i.e. a 3S pack should read at least 6.6 Volts.

9. Do not permit voltage during charge to exceed 4.2 Volts per Series cell under any circumstances. i.e. a 3S pack should not be allowed to exceed 12.6 Volts

### **Using Guidelines and Precautions**

1. **Wire lead shorts can cause fire!** If you accidentally short the wires, the battery must be placed in a safe area for observation for approximately 15 minutes. A battery can still ignite even after 10 minutes. Additionally, if a short occurs and contact is made with metal (such as rings on your hand), severe injuries may occur due to the conductivity of electric current.

2. If for any reason you need to cut the terminal wires, it is necessary to cut each wire separately, ensuring the wires to not touch each other or a short may occur, potentially causing a fire.

3. In the event of a crash, you must remove battery for observation and place in a safe open area away from any combustible material for approximately 15 minutes.

4. Never store or charge battery pack inside your car in extreme temperatures, since extreme temperature could ignite fire.

